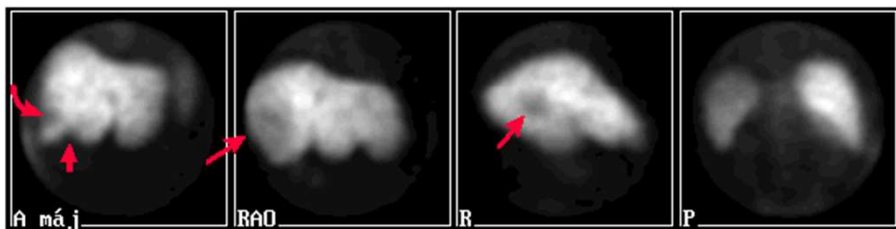
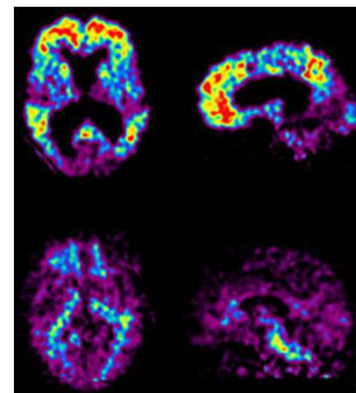


Ionizáló sugárzások diagnosztikai és terápiás alkalmazásai



Smeller
László



Semmelweis Egyetem
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet



1. Az izotópdiaagnosztika fizikai alapjai

- **Bevezetés**
- **Az izotóp kiválasztásának szempontjai**
- **Izotópdiagnosztikai vizsgálati technikák**

Bevezetés

Izotóp : azonos **Z** különböző **N** különböző **A**
rendszer szám neutrons szám tömeg szám

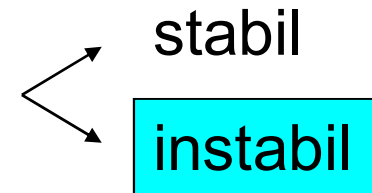
Egy elem különböző izotópjai

A kémiai tulajdonságokat az elektronburok határozza meg.

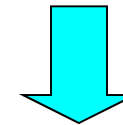
Z = elektronok száma

=> a stabil és instabil izotópok kémiai és biológiai viselkedése (anyagcsere!) megegyezik.

De a **radioaktív** izotóp sugároz és **detektálható!**



radioaktív



bomlik,
bomláskor sugároz

Izotóp \Rightarrow radioaktív izotóp

Izotópdiagnosztika: olyan módszer, amely során a radioaktív **izotópok** által kibocsátott **sugárzás mennyiségének**, térbeli és időbeli **eloszlásának** detektálásával nyerünk **diagnosztikai információt**.

Milyen információt kaphatunk?

A vizsgált szerv mérete,
működőképessége, a funkció
sebessége (pl. pajzsmirigy
jódfelhasználása)

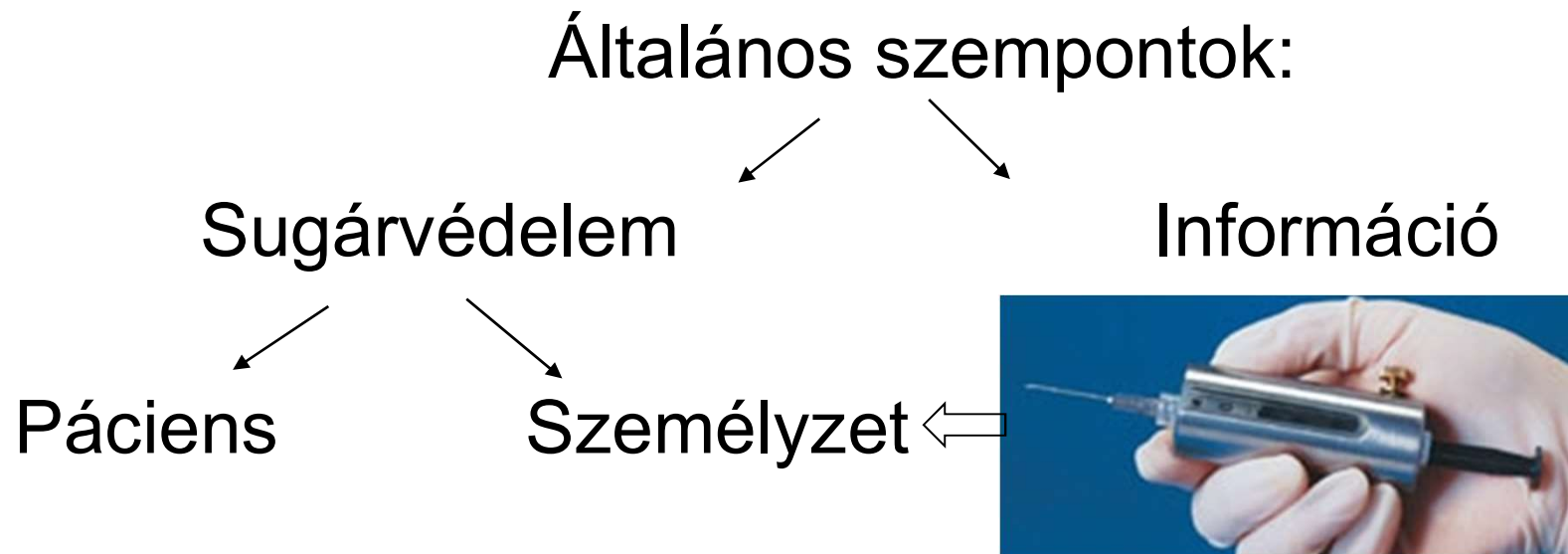


Hevesy György
1885-1966
1943 Nobel díj



Többletinformáció: Funkció! Morfológiai információ mellett a működés sebességét is megmérhetjük: hipofunkció - hiperfunkció

megj: ne keverjük össze a kontrasztanyaggal!!!



Alapvető sugárvédelmi szabály: Az izotóp akkor a legveszélyesebb, ha inkorporálódik.
Most mégis ezt tesszük! Miért?

Cost-benefit elv:
Megéri-e a sugárkárosodás kockázata az így kapható információt?
(v.ö.: Minden tevékenység veszélyes!)

Az izotóp kiválasztásának szempontjai

1. Melyik **elem** izotópját használjuk?
2. Mekkora **aktivitást** használjunk?
3. Milyen hosszú legyen az izotóp **felezési ideje**?
4. Milyen **sugárzást** emittáljon az izotóp?
5. Mekkora legyen a sugárzás **energiája**?

1. Melyik elem izotópját használjuk?

Amelyik felhalmozódik a vízszennyezés során a szervezetben (kritikus szerv)

Tipikus pl. ^{131}I pajzsmirigy
 ^{59}Fe vörösvérte

De! Nincs minden szervhez illeszköző hordozómolekula

előny: (majdnem) szabadon választható az izotóp,
az izotóp tulajdonságai **optimalizálhatóak** a
sugárvédelem és a mérés szempontjából

Megj: nagyon **kis mennyiség!** pmol =>
ilyen kis mennyiségben nem mérgező!

Az elemek periódusos rendszere

1	2																	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1	H																	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
3	Li	4	Be													10	Ne																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5	Na	6	Mg	3	11	3	12													10	Ar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
4	19	4	20	4	21	4	22	4	23	4	24	4	25	4	26	4	27	4	28	4	29	4	30	4	31	4	32	4	33	4	34	4	35	4	36	4	37	4	38	4	39	4	40	4	41	4	42	4	43	4	44	4	45	4	46	4	47	4	48	4	49	4	50	4	51	4	52	4	53	4	54	4	55	4	56	4	57	4	58	4	59	4	60	4	61	4	62	4	63	4	64	4	65	4	66	4	67	4	68	4	69	4	70	4	71	4	72	4	73	4	74	4	75	4	76	4	77	4	78	4	79	4	80	4	81	4	82	4	83	4	84	4	85	4	86	4	87	4	88	4	89	4	90	4	91	4	92	4	93	4	94	4	95	4	96	4	97	4	98	4	99	4	100	4	101	4	102	4	103	4	104	4	105	4	106	4	107	4	108	4	109	4	110	4	111	4	112	4	113	4	114	4	115	4	116	4	117	4	118	4	119	4	120	4	121	4	122	4	123	4	124	4	125	4	126	4	127	4	128	4	129	4	130	4	131	4	132	4	133	4	134	4	135	4	136	4	137	4	138	4	139	4	140	4	141	4	142	4	143	4	144	4	145	4	146	4	147	4	148	4	149	4	150	4	151	4	152	4	153	4	154	4	155	4	156	4	157	4	158	4	159	4	160	4	161	4	162	4	163	4	164	4	165	4	166	4	167	4	168	4	169	4	170	4	171	4	172	4	173	4	174	4	175	4	176	4	177	4	178	4	179	4	180	4	181	4	182	4	183	4	184	4	185	4	186	4	187	4	188	4	189	4	190	4	191	4	192	4	193	4	194	4	195	4	196	4	197	4	198	4	199	4	200	4	201	4	202	4	203	4	204	4	205	4	206	4	207	4	208	4	209	4	210	4	211	4	212	4	213	4	214	4	215	4	216	4	217	4	218	4	219	4	220	4	221	4	222	4	223	4	224	4	225	4	226	4	227	4	228	4	229	4	230	4	231	4	232	4	233	4	234	4	235	4	236	4	237	4	238	4	239	4	240	4	241	4	242	4	243	4	244	4	245	4	246	4	247	4	248	4	249	4	250	4	251	4	252	4	253	4	254	4	255	4	256	4	257	4	258	4	259	4	260	4	261	4	262	4	263	4	264	4	265	4	266	4	267	4	268	4	269	4	270	4	271	4	272	4	273	4	274	4	275	4	276	4	277	4	278	4	279	4	280	4	281	4	282	4	283	4	284	4	285	4	286	4	287	4	288	4	289	4	290	4	291	4	292	4	293	4	294	4	295	4	296	4	297	4	298	4	299	4	300	4	301	4	302	4	303	4	304	4	305	4	306	4	307	4	308	4	309	4	310	4	311	4	312	4	313	4	314	4	315	4	316	4	317	4	318	4	319	4	320	4	321	4	322	4	323	4	324	4	325	4	326	4	327	4	328	4	329	4	330	4	331	4	332	4	333	4	334	4	335	4	336	4	337	4	338	4	339	4	340	4	341	4	342	4	343	4	344	4	345	4	346	4	347	4	348	4	349	4	350	4	351	4	352	4	353	4	354	4	355	4	356	4	357	4	358	4	359	4	360	4	361	4	362	4	363	4	364	4	365	4	366	4	367	4	368	4	369	4	370	4	371	4	372	4	373	4	374	4	375	4	376	4	377	4	378	4	379	4	380	4	381	4	382	4	383	4	384	4	385	4	386	4	387	4	388	4	389	4	390	4	391	4	392	4	393	4	394	4	395	4	396	4	397	4	398	4	399	4	400	4	401	4	402	4	403	4	404	4	405	4	406	4	407	4	408	4	409	4	410	4	411	4	412	4	413	4	414	4	415	4	416	4	417	4	418	4	419	4	420	4	421	4	422	4	423	4	424	4	425	4	426	4	427	4	428	4	429	4	430	4	431	4	432	4	433	4	434	4	435	4	436	4	437	4	438	4	439	4	440	4	441	4	442	4	443	4	444	4	445	4	446	4	447	4	448	4	449	4	450	4	451	4	452	4	453	4	454	4	455	4	456	4	457	4	458	4	459	4	460	4	461	4	462	4	463	4	464	4	465	4	466	4	467	4	468	4	469	4	470	4	471	4	472	4	473	4	474	4	475	4	476	4	477	4	478	4	479	4	480	4	481	4	482	4	483	4	484	4	485	4	486	4	487	4	488	4	489	4	490	4	491	4	492	4	493	4	494	4	495	4	496	4	497	4	498	4	499	4	500	4	501	4	502	4	503	4	504	4	505	4	506	4	507	4	508	4	509	4	510	4	511	4	512	4	513	4	514	4	515	4	516	4	517	4	518	4	519	4	520	4	521	4	522	4	523	4	524	4	525	4	526	4	527	4	528	4	529	4	530	4	531	4	532	4	533	4	534	4	535	4	536	4	537	4	538	4	539	4	540	4	541	4	542	4	543	4	544	4	545	4	546	4	547	4	548	4	549	4	550	4	551	4	552	4	553	4	554	4	555	4	556	4	557	4	558	4	559	4	560	4	561	4	562	4	563	4	564	4	565	4	566	4	567	4	568	4	569	4	570	4	571	4	572	4	573	4	574	4	575	4	576	4	577	4	578	4	579	4	580	4	581	4	582	4	583	4	584	4	585	4	586	4	587	4	588	4	589	4	590	4	591	4	592	4	593	4	594	4	595	4	596	4	597	4	598	4	599	4	600	4	601	4	602	4	603	4	604	4	605	4	606	4	607	4	608	4	609	4	610	4	611	4	612	4	613	4	614	4	615	4	616	4	617	4	618	4	619	4	620	4	621	4	622	4	623	4	624	4	625	4	626	4	627	4	628	4	629	4	630	4	631	4	632	4	633	4	634	4	635	4	636	4	637	4	638	4	639	4	640	4	641	4	642	4	643	4	644	4	645	4	646	4	647	4	648	4	649	4	650	4	651	4	652	4	653	4	654	4	655	4	656	4	657	4	658	4	659	4	660	4	661	4	662	4	663	4	664	4	665	4	666	4	667	4	668	4	669	4	670	4	671	4	672	4	673	4	674	4	675	4	676	4	677	4	678	4	679	4	680	4	681	4	682	4	683	4	684	4	685	4	686	4	687	4	688	4	689	4	690	4	691	4	692	4	693	4	694	4	695	4	696	4	697	4	698	4	699	4	700	4	701	4	702	4	703	4	704	4	705	4	706	4	707	4	708	4	709	4	710	4	711	4	712	4	713	4	714	4	715	4	716	4	717	4	718	4	719	4	720	4	721	4	722	4	723	4	724	4	725	4	726	4	727	4	728	4	729	4	730	4	731	4	732	4	733	4	734	4	735	4	736	4	737	4	738	4	739	4	740	4	741	4	742	4	743	4	744	4	745	4	746	4	747	4	748	4	749	4	750	4	751	4	752	4	753	4	754	4	755	4	756	4	757	4	758	4	759	4	760	4	761	4	762	4	763	4	764	4	765	4	766	4	767	4	768	4	769	4	770	4	771	4	772	4	773	4	774	4	775	4	776	4	777	4	778	4	779	4	780	4	781	4	782	4	783	4	784	4	785	4	786	4	787	4	788	4	789	4	790	4	791	4	792	4	793	4	794	4	795	4	796	4	797	4	798	4	799	4	800	4	801	4	802	4	803	4	804	4	805	4	806	4	807	4	808	4	809	4	810	4	811	4	812	4	813	4	814	4	815	4	816	4	817	4	818	4	819	4	820	4	821	4	822	4	823	4	824	4	825	4	826	4	827	4	828	4	829	4	830	4	831	4	832	4	833	4	834	4	835	4	836	4	837	4	838	4	839	4	840	4	841	4	842	4	843	4	844	4	845	4	846	4	847	4	848	4	849	4	850	4	851	4	852	4	853	4	854	4	855	4	856	4	857	4	858	4	859	4	860	4	861	4	862	4	863	4	864	4	865	4	866	4	867	4	868	4	869	4	870	4	871	4	872	4	873	4	874	4	875	4	876	4	877	4	878	4	879	4	880	4	881	4	882	4	883	4	884	4	885	4	886	4	887	4	888	4	889	4	890	4	891	

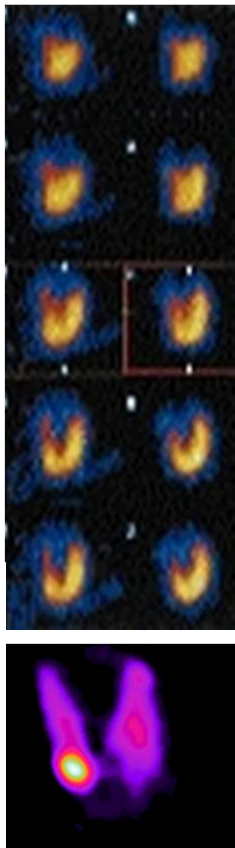
2. Mekkora aktivitást használjunk?

sugárvédelem:
kicsit

detektálás:
nagyot

„arany középút”
MBq...100 MBq

függ a mérés idejétől is!
gyors méréshez nagy Δ
kell! pl. szív



Detektált γ fotonok
száma Poisson
eloszlást követ:

$$\text{szórás} \approx \sqrt{\text{átlag}}$$

Pl:


$$N_{\text{imp}} = 100$$

$$\Rightarrow \text{szórás} = 10 \text{ (10\%)}$$

$$N'_{\text{imp}} = 10000$$

$$\Rightarrow \text{szórás} = 100 \text{ (1\%)}$$

3. Felezési idő

$$\Lambda = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \qquad \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$\Lambda = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} N$$

A bevitt radioaktív atomok száma: $N = \frac{\Lambda T}{\ln 2}$

Mivel (majdnem) az összes radioaktív atom a testben bomlik el: $N \sim$ sugárterhelés

Ugyanakkora Λ mellett a sugárterhelés kisebb felezési idejű izotóp választásával csökkenthető!

$\Rightarrow T$ legyen minél rövidebb

De!

- T nem lehet rövidebb, mint a vizsgálandó folyamat karakterisztikus ideje.

Pl. vvt élettartam \approx hónap

~~^{99m}Tc~~ $T = 6\text{h}$ (túl rövid!)

^{51}Cr $T = 28\text{ nap}$ OK

~~^{60}Co~~ $T = 5\text{ év}$ (túl hosszú!)

- Szállítás problémája:

$10 T$ alatt $A \rightarrow A/1000$

Pl.: ha $T = 2$ perc 20 perc múlva $1\text{MBq} \rightarrow 1\text{kBq}$

\Rightarrow a nagyon rövid felezési idejű izotópokat helyben kell előállítani! (ciklotron, Tc-generátor)

pl. ^{18}F 110 perc ^{15}O 2 perc (PET)

4. Milyen sugárzást emittáljon az izotóp?

$\alpha, -$
 β^+, β } *hatótáv* { $< \text{mm}$
szövetben { mm-cm } nem lép ki a testből



információt nem ad,
csak károsít

γ : csak részben nyelődik el, detektálható

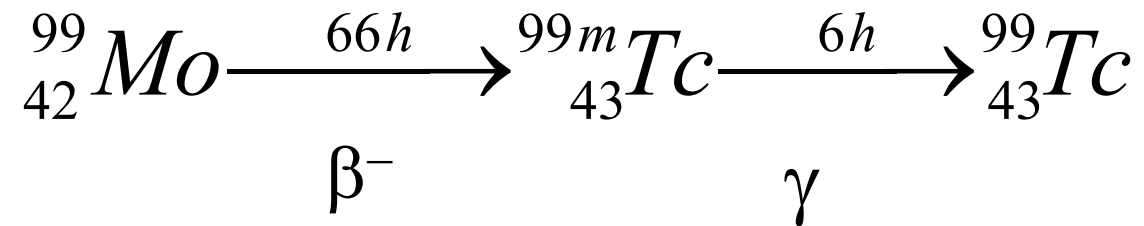
Az optimális izotóp csak γ sugárzást emittál!

kivétel PET, ahol β^+ izotópot használunk. (ld. később)

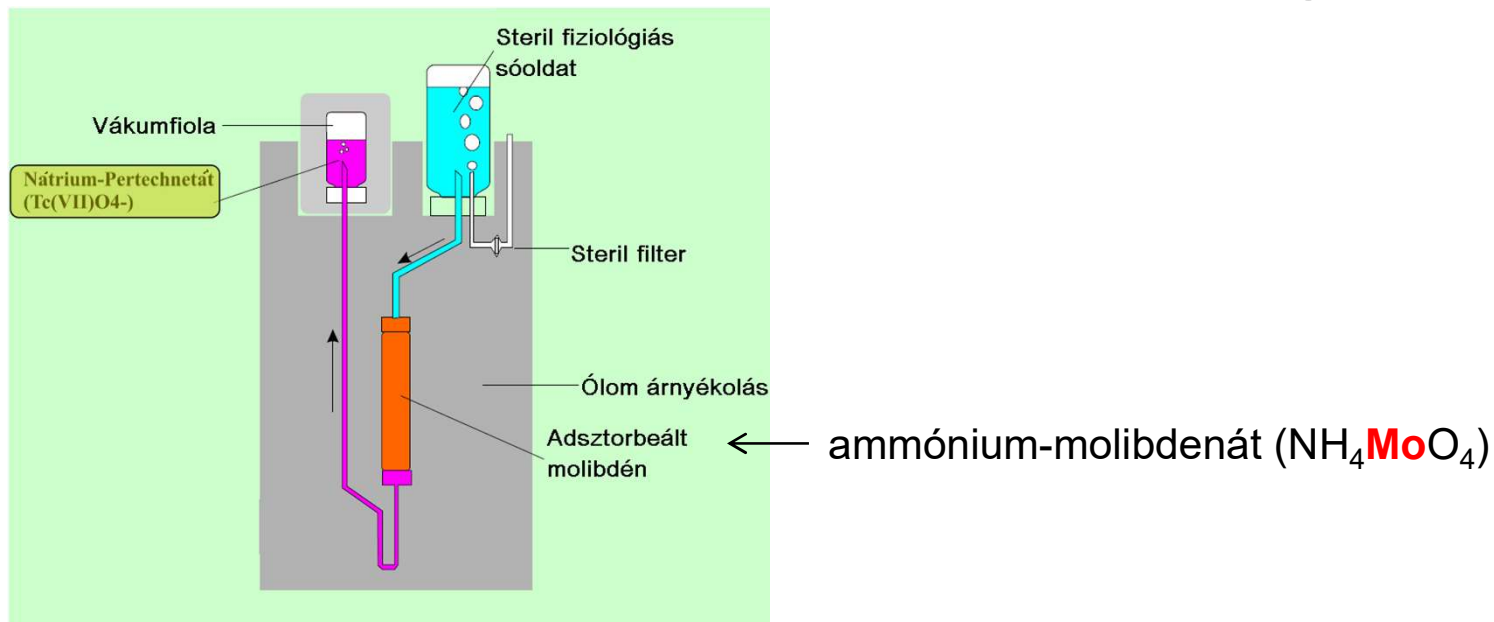
A tisztán γ -sugárzó izotóp:

- ritka
- izomer magátalakulás pl. $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Tc generátor



Időben szétválik a β^- és a γ kibocsátás.
Elkülöníthető a ${}^{99m}\text{Tc}$ ami tisztán γ -sugárzó.



5. Mekkora energiájú legyen a γ -foton?

nagy energia:

kevéssé nyelődik el a szövetekben (alacsony
sugárkárosodás)

de nehéz detektálni

kis energia:

nagyrészt elnyelődik a szövetekben => károsít

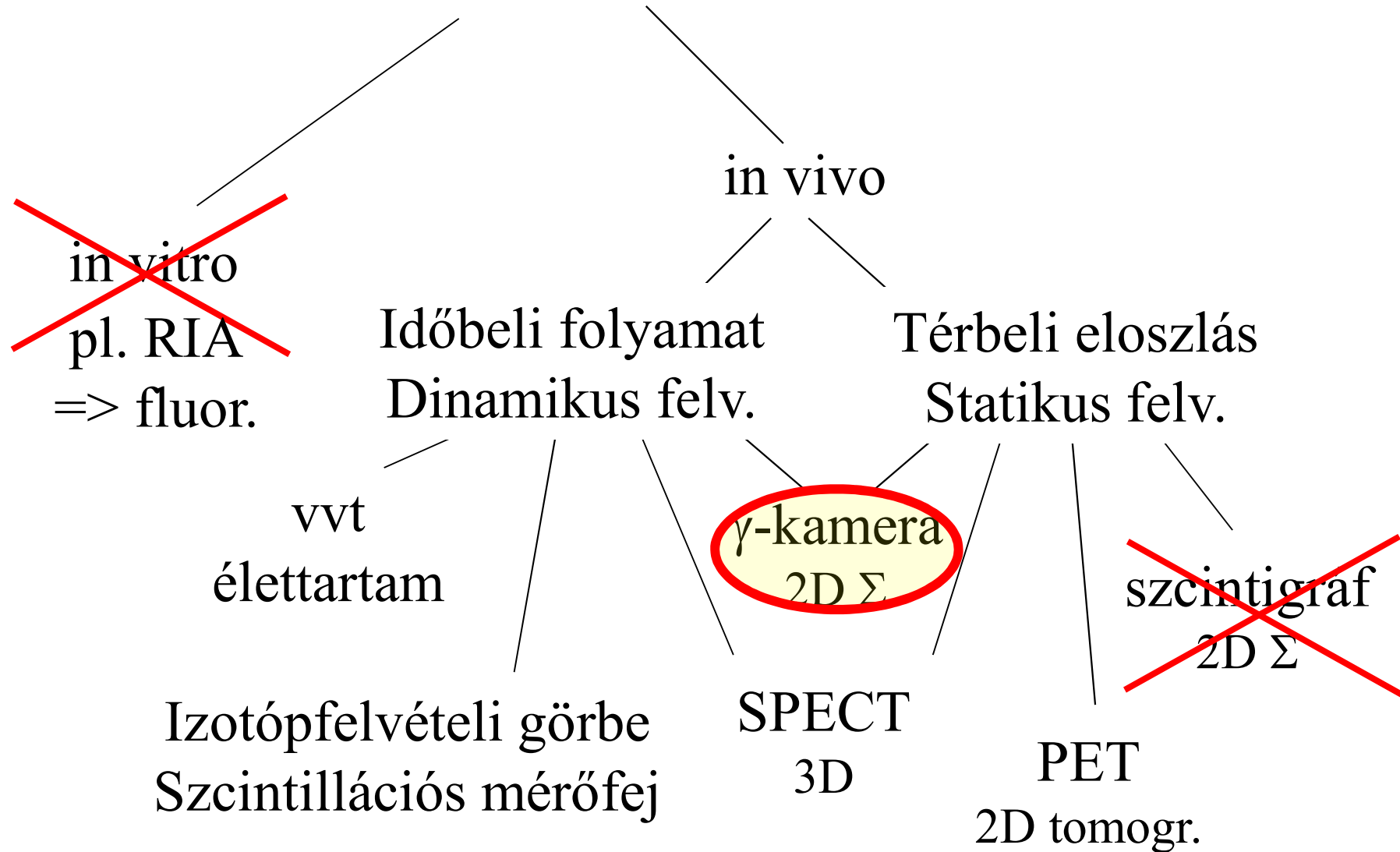
arany középút: néhány 100 keV optimális

^{99m}Tc : 140 keV OK

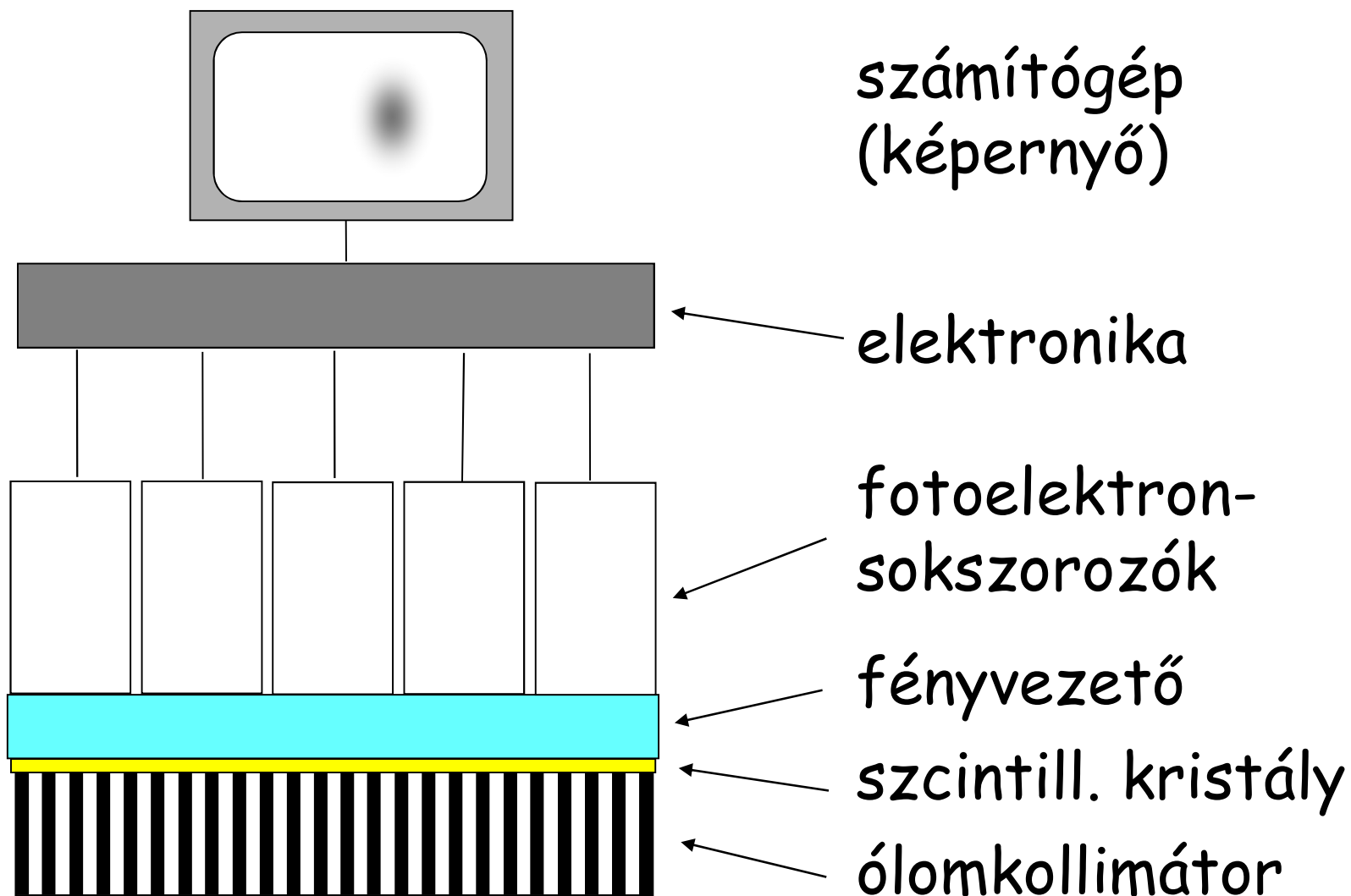
Optimális izotóp: ^{99m}Tc

nagyon sok vizsgálathoz használják
megfelelő hordozómolekulához kötve

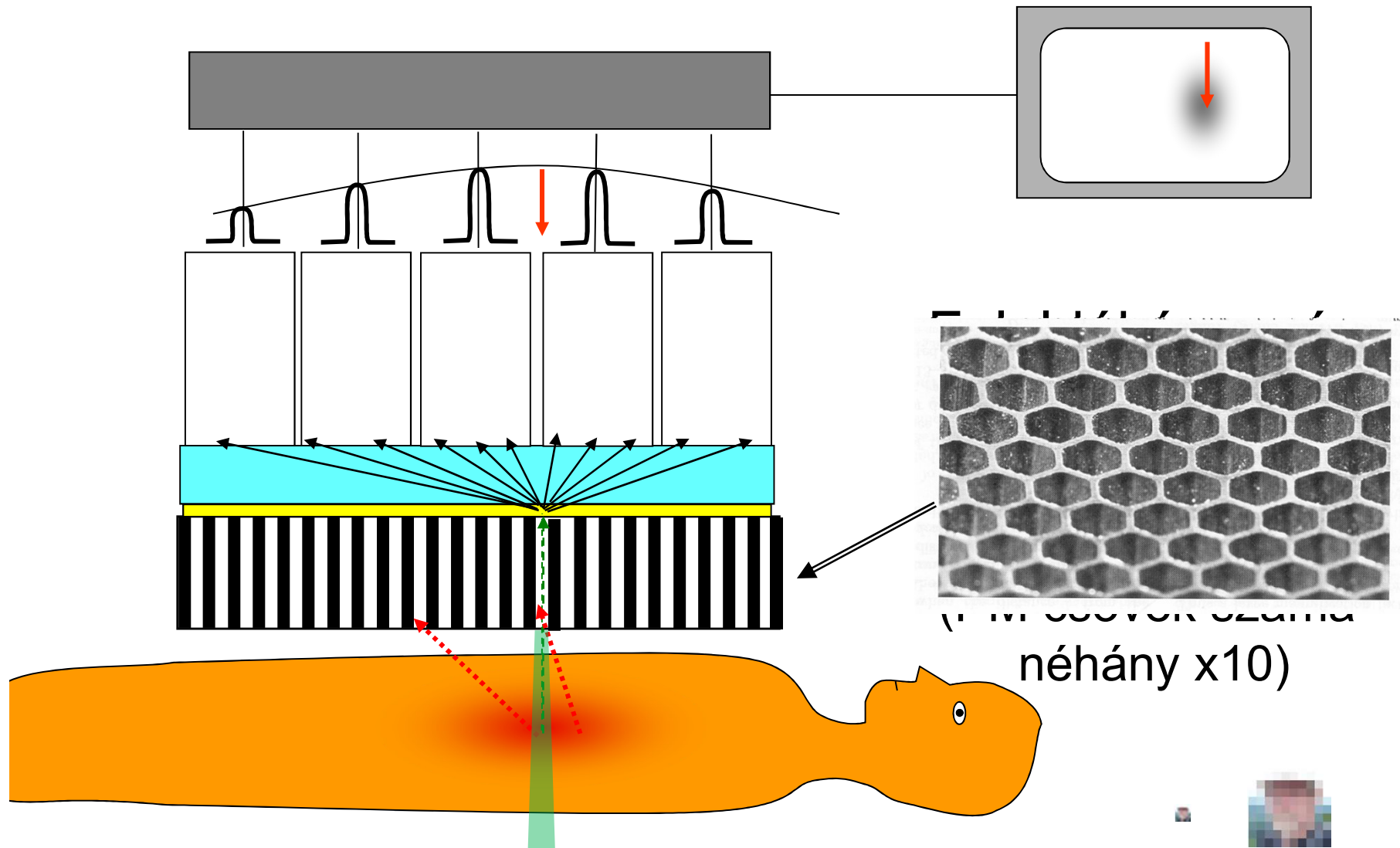
Izotópdiagnostikai eljárások

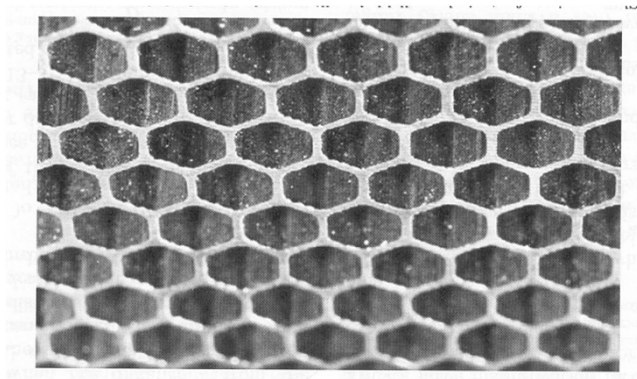


In vivo > Térbeli eloszlás > γ -kamera



In vivo > Térbeli eloszlás > γ -kamera

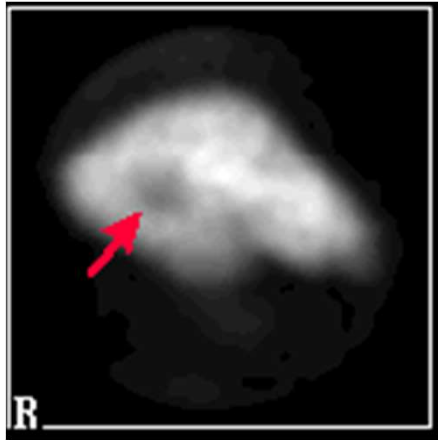






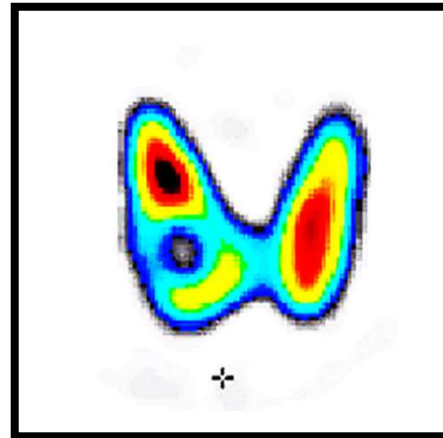


Néhány példa:



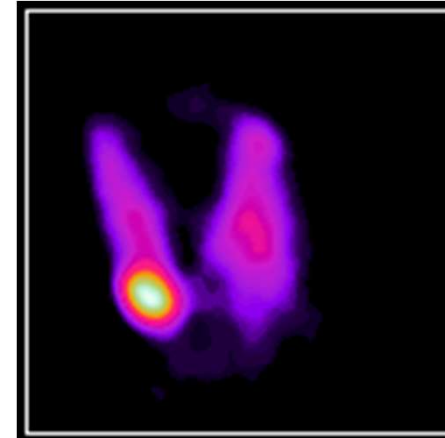
Máj metasztázis

^{99m}Tc fitát



pajzsmirigy

hideggöb



meleggöb

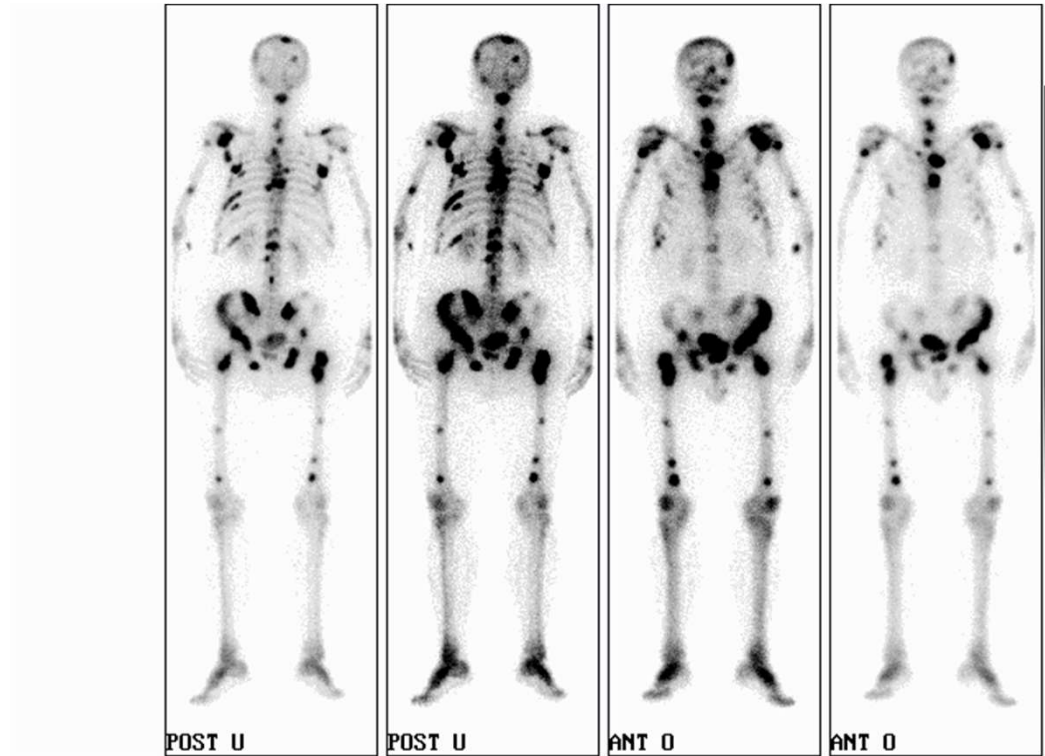
^{99m}Tc pertechnetát

Csontscintigráfia

^{99m}Tc -MDP (^{99m}Tc -methyl diphosphonate): 600 MBq



normális

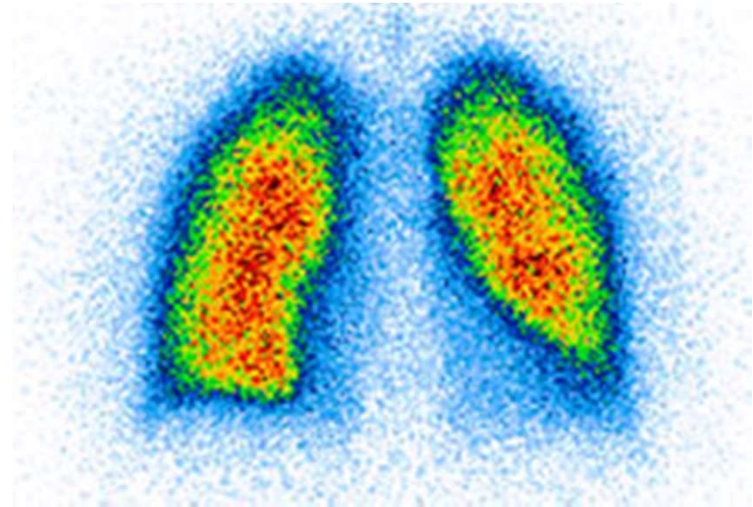


metasztázisok

Tüdő szcintigráfia

Perfúzió (vérkeringés)

Ventilláció (légutak)



kettős izotópjelzés

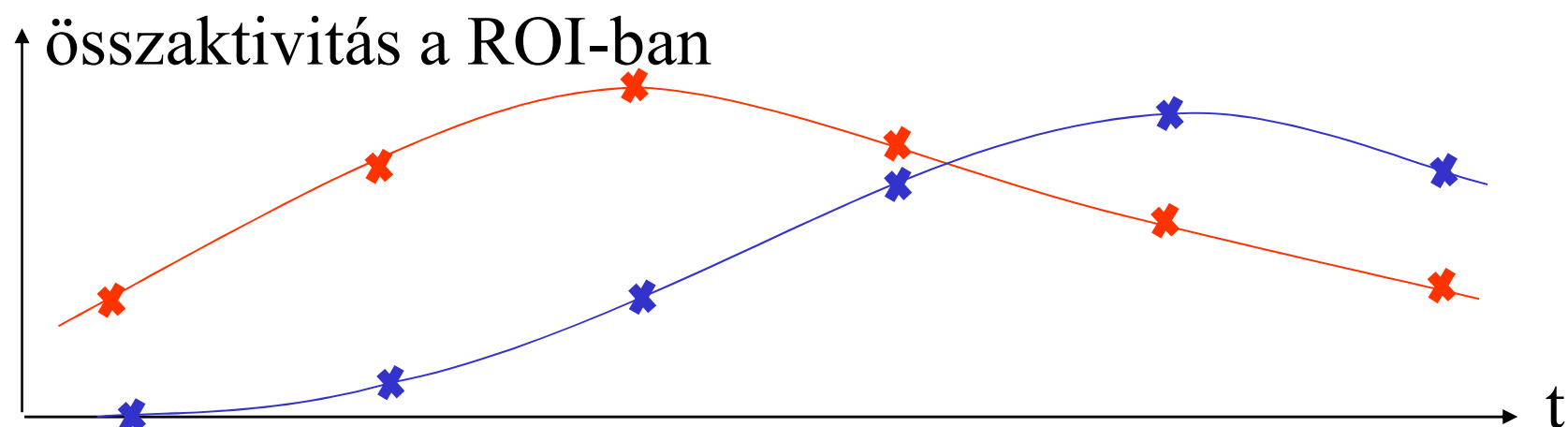
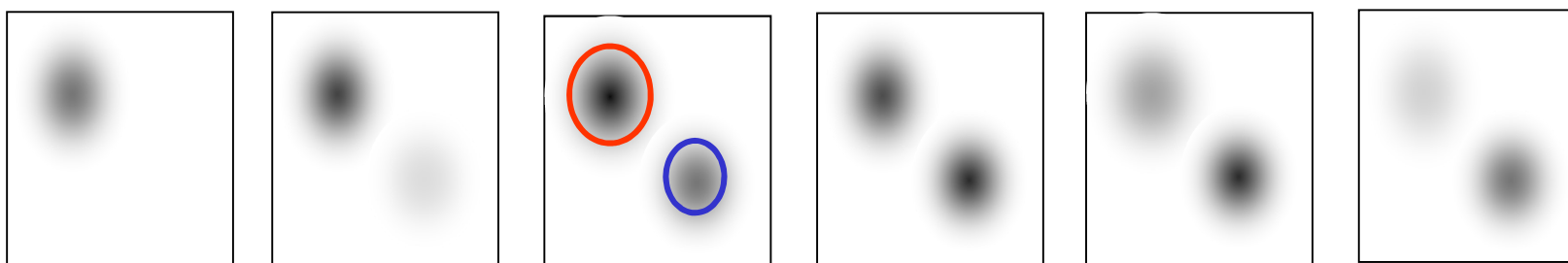
lehetősége

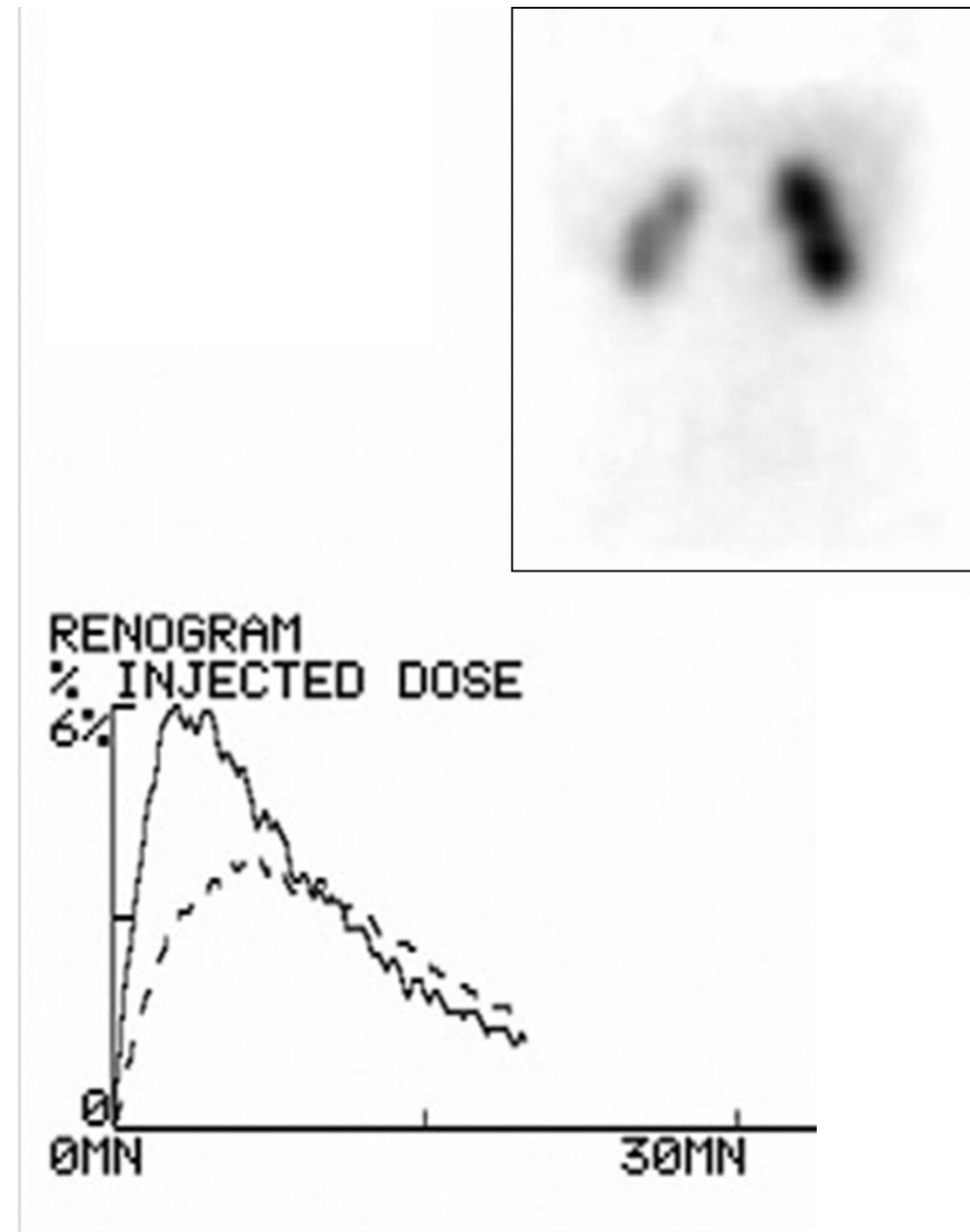
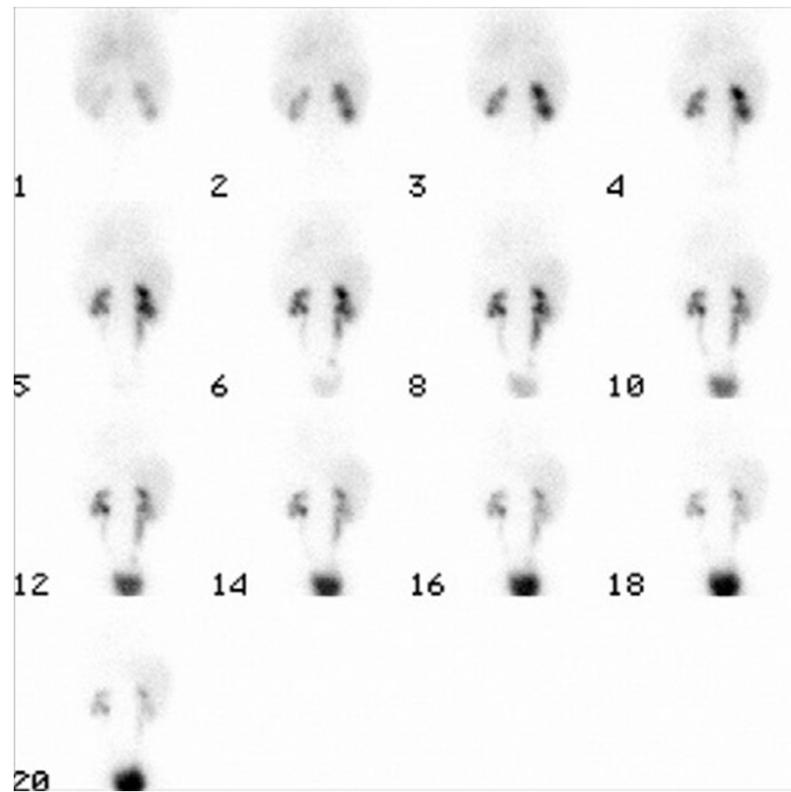
(ld. gyakorlat a 2. szemeszterben)

Időbeli és térbeli információ egyidejűleg:

Dinamikus felvétel γ -kamerával

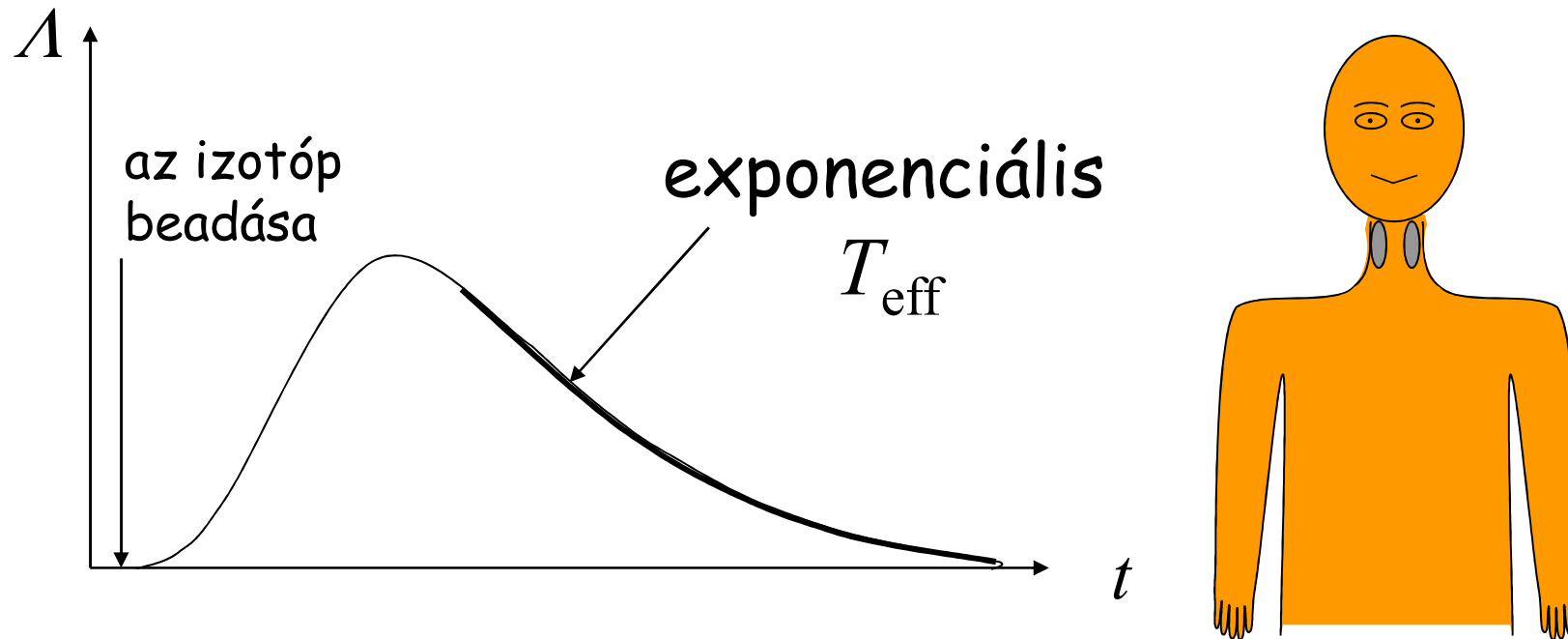
Egymás utáni γ -kamera felvételek:





Tipikus izotópfelvételi görbe

pl: pajzsmirigy ^{131}I (jódfelvételi görbe)
 ^{131}I β^- -t is sugároz ezért manapság inkább $^{99\text{m}}\text{Tc}$
(Na pertechnetát $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$)



Biológiai kiürülés
+ fizikai bomlás

A bomlási
valószínűségek adódnak

össze: $\lambda_{\text{fiz}} + \lambda_{\text{biol}} = \lambda_{\text{eff}}$

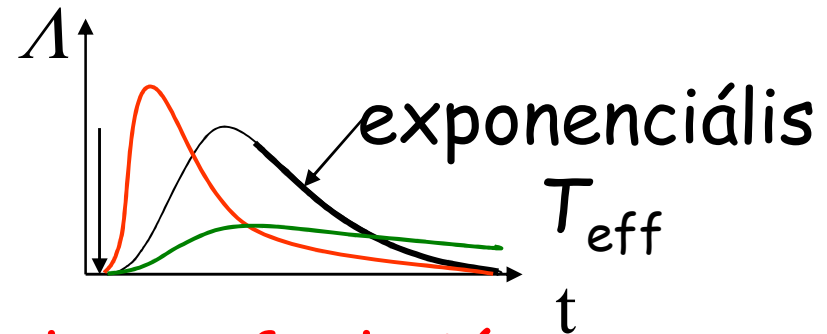
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{fiz}}} + \frac{1}{T_{\text{biol}}}$$

↑
mérjük

↑
tudjuk

↑
számoljuk
(táblázat)

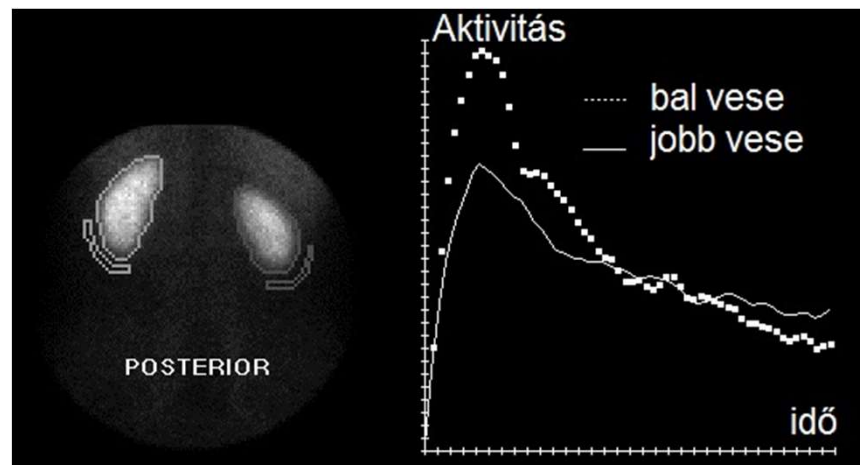
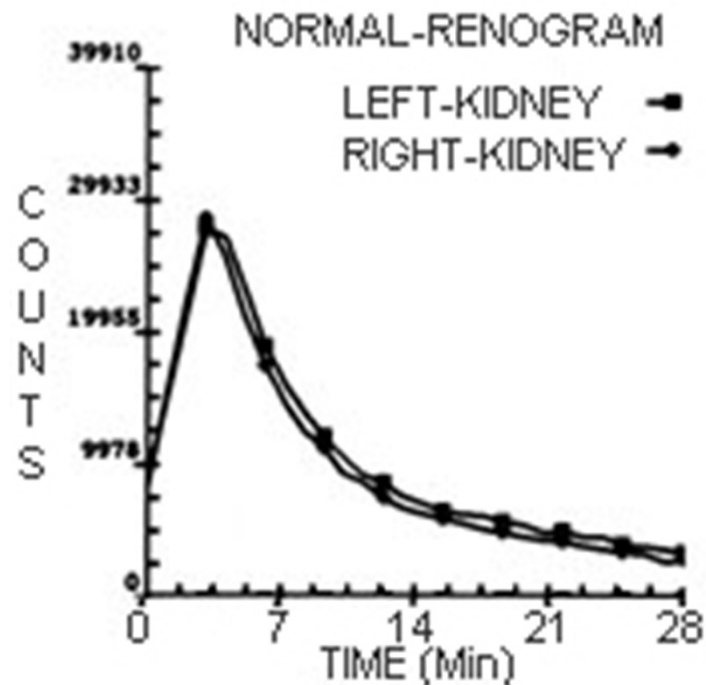


hyperfunkció

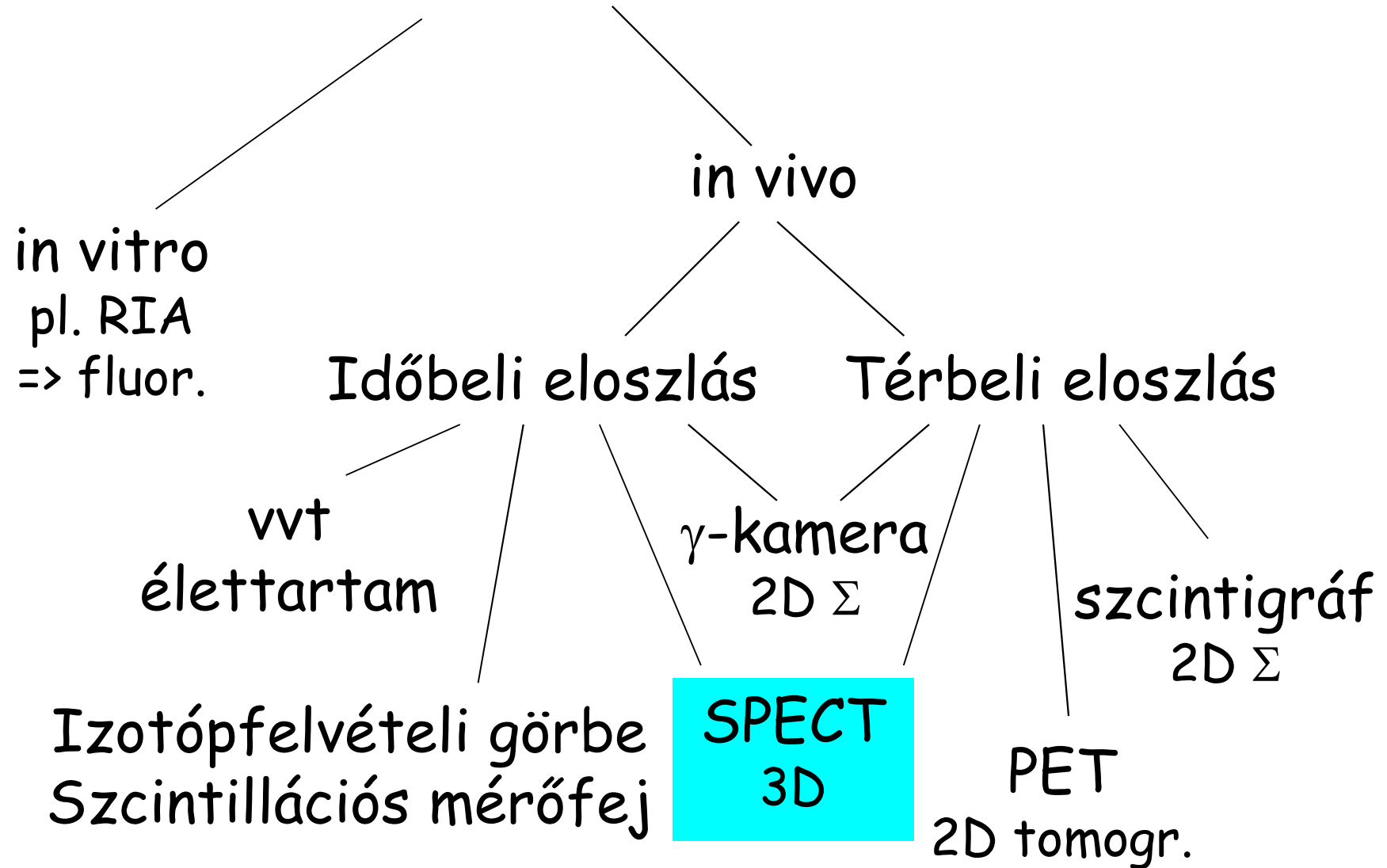
hypofunkció

Ue. vesefunkció vizsgálatára (renográfia)

Példa: Vesefunkció vizsgálat (renogram)

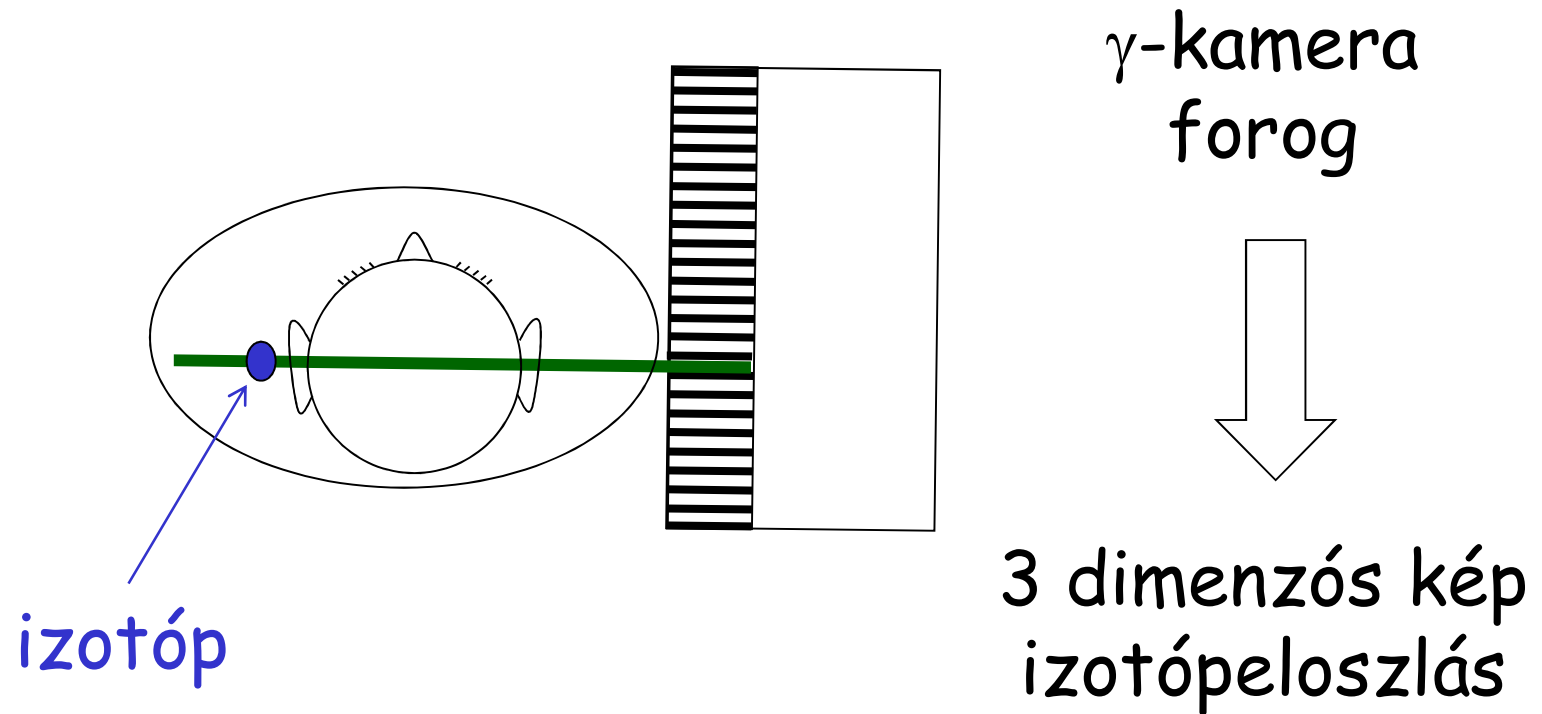


Izotópdiagnosztikai eljárások



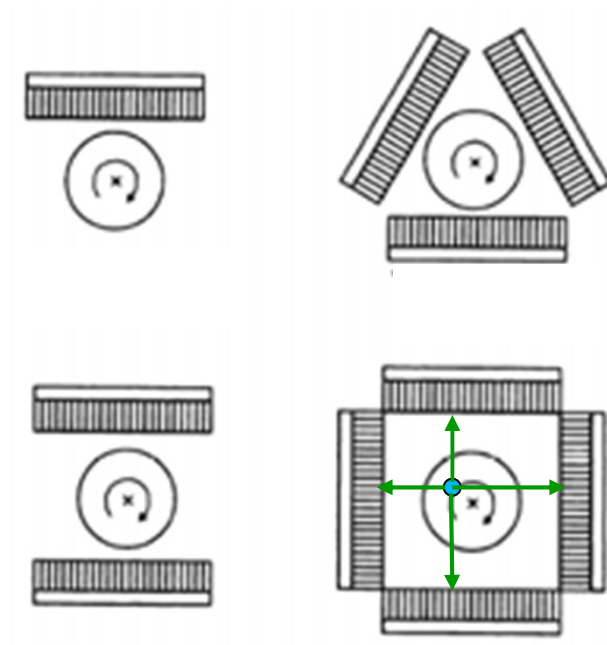
SPECT

(Single Photon Emission Computed Tomography)



SPECT

(Single Photon Emission Computed Tomography)

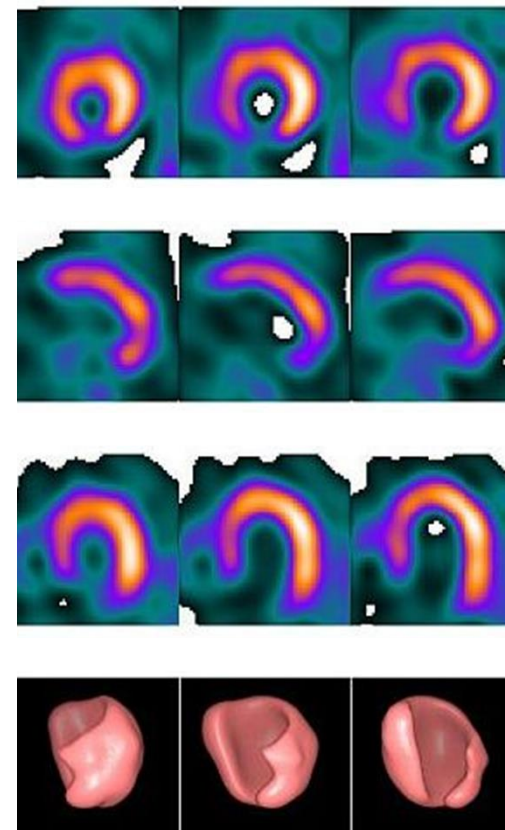
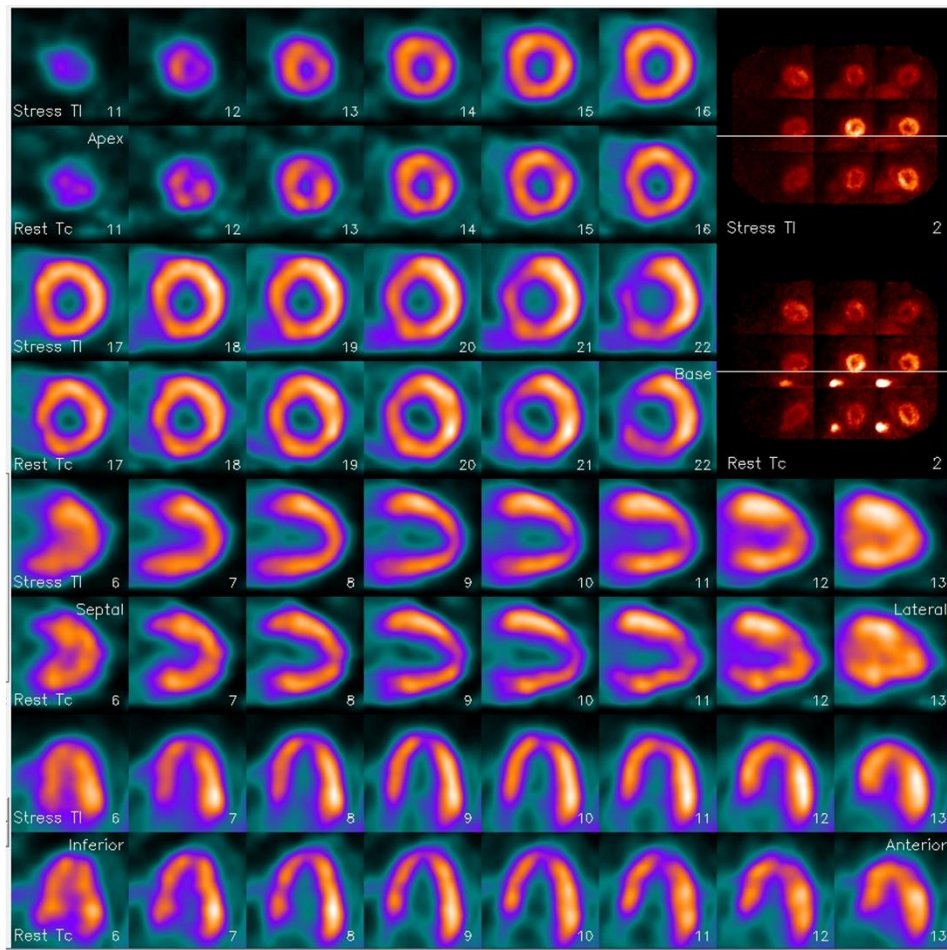


Különböző γ -kamera elrendezések

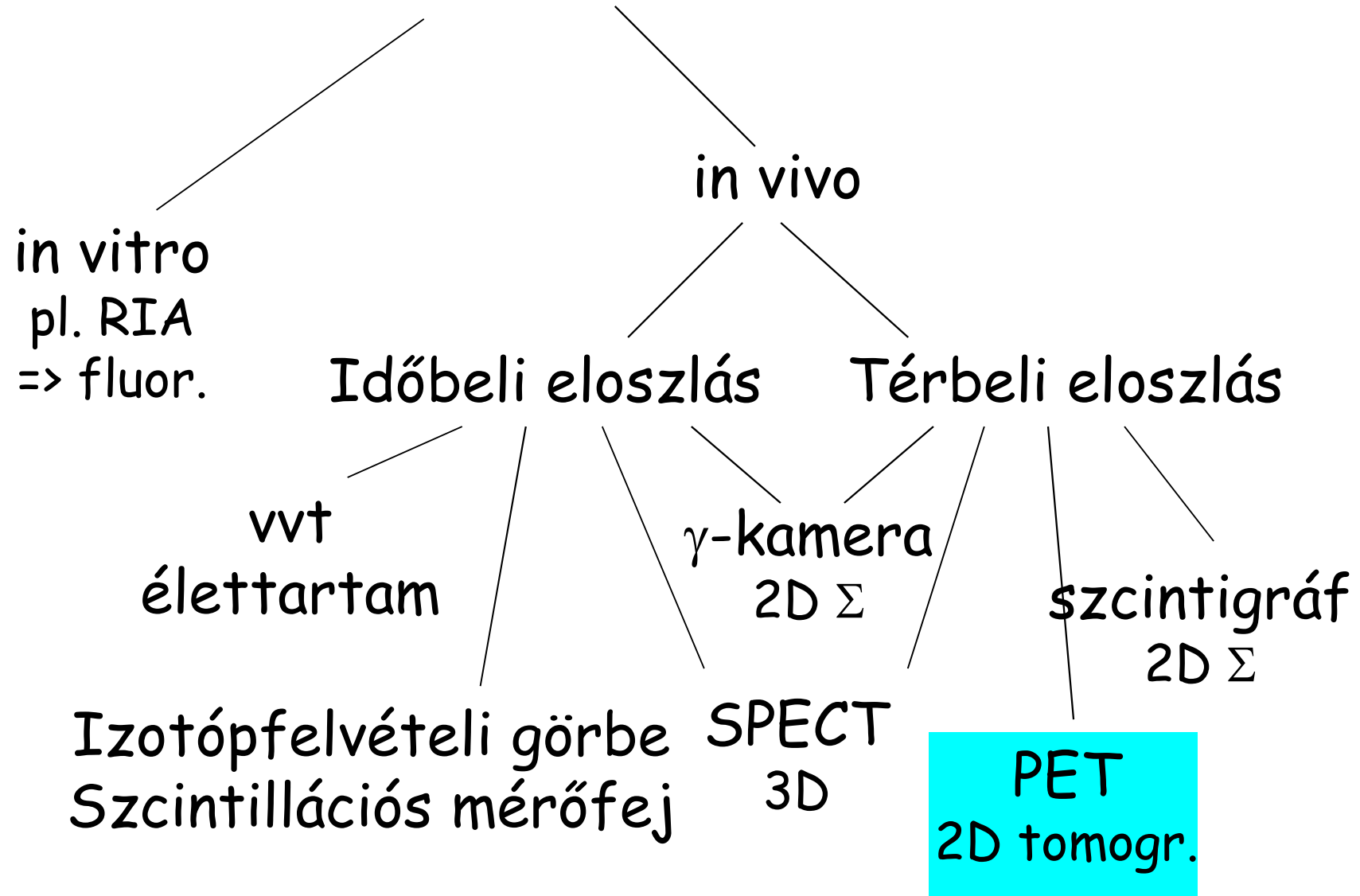
SPECT



Néhány példa: szív SPECT



Izotópdiagnosztikai eljárások



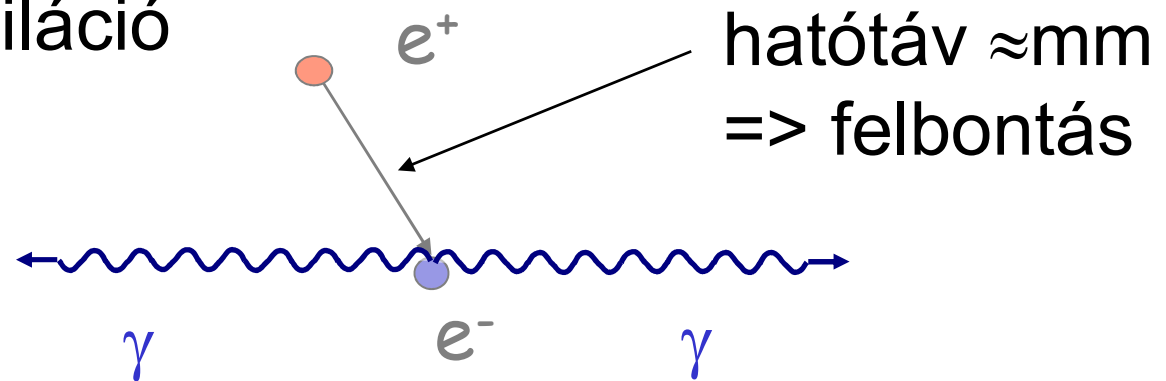
PET (Positron Emission Tomography)

Pozitron bomló izotóp!

Természetben nem fordul elő

Mesterséges előállítás (pl. ciklotron) helyben!

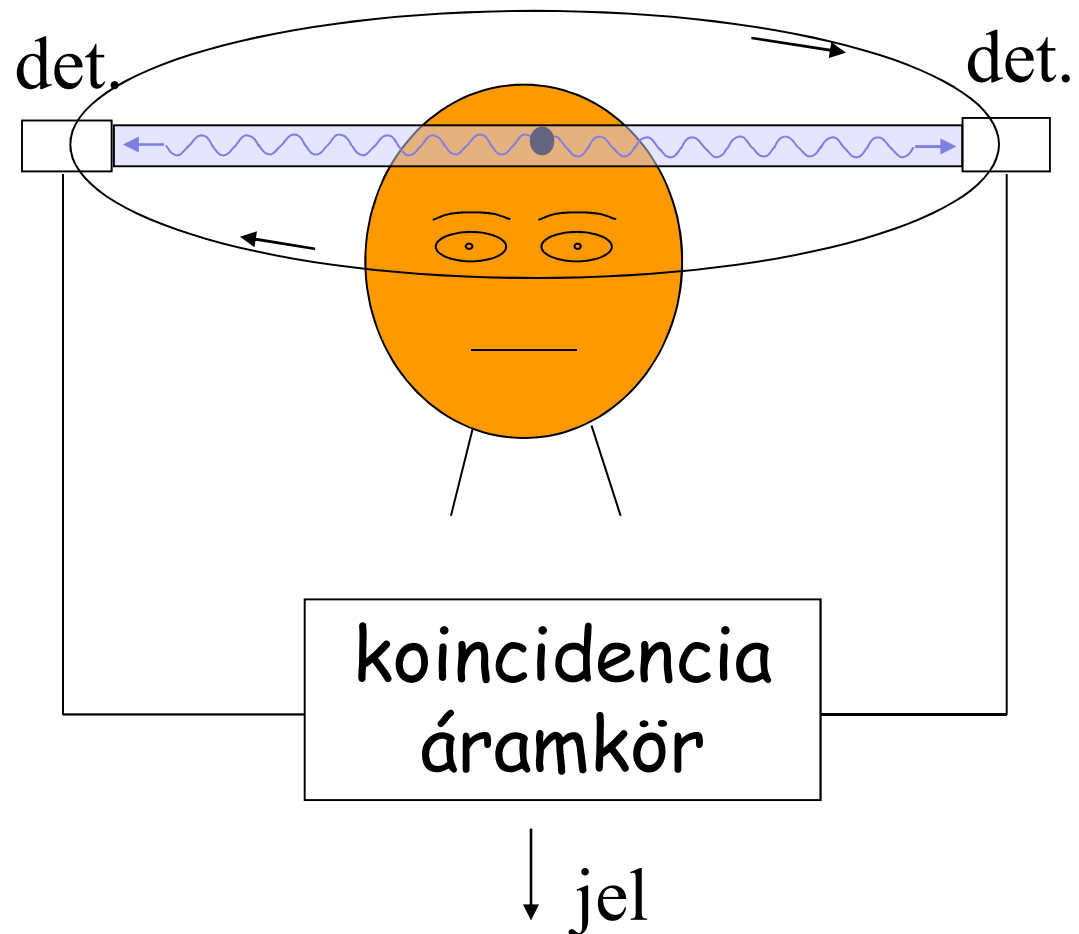
Pozitron annihiláció



izotóp	T (perc)	E_{\max} (MeV)	átl. hatótáv (mm)
^{11}C	20,4	0,96	0,3
^{13}N	9,9	1,19	0,4
^{15}O	2,9	1,72	1,5
^{18}F	110	0,64	0,2
^{68}Ga	68	1,89	1,9
^{82}Rb	1,3	3,35	2,6

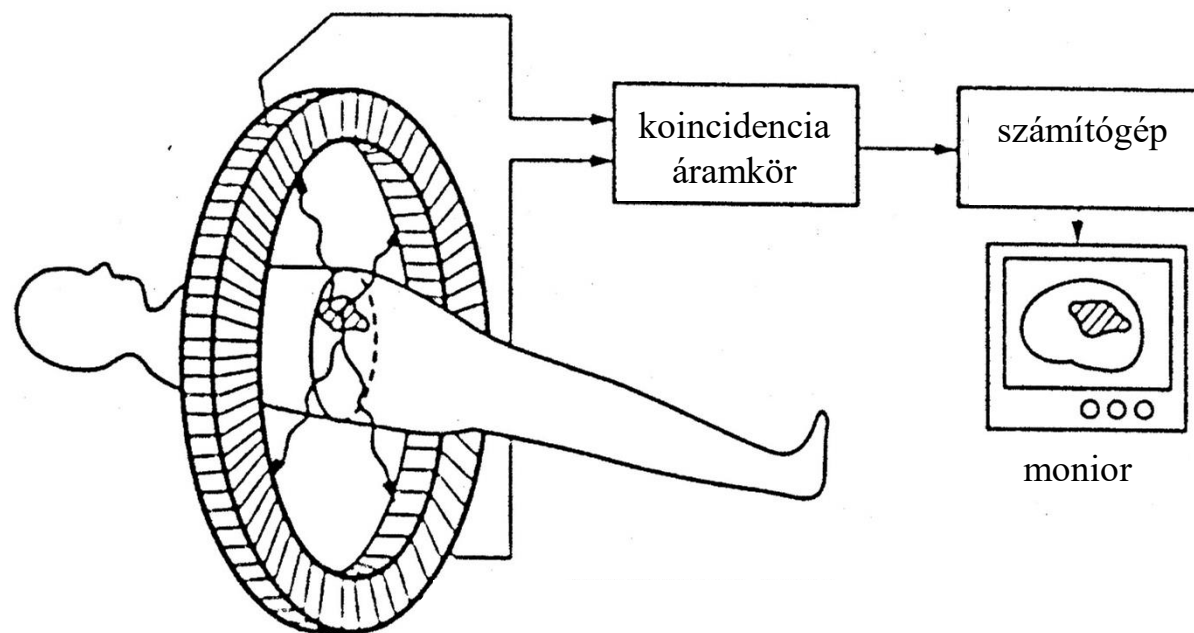
PET (Positron Emission Tomography)

elv:



A PET gyakorlati megvalósítása:

Körkörös detektorgyűrűrendszer

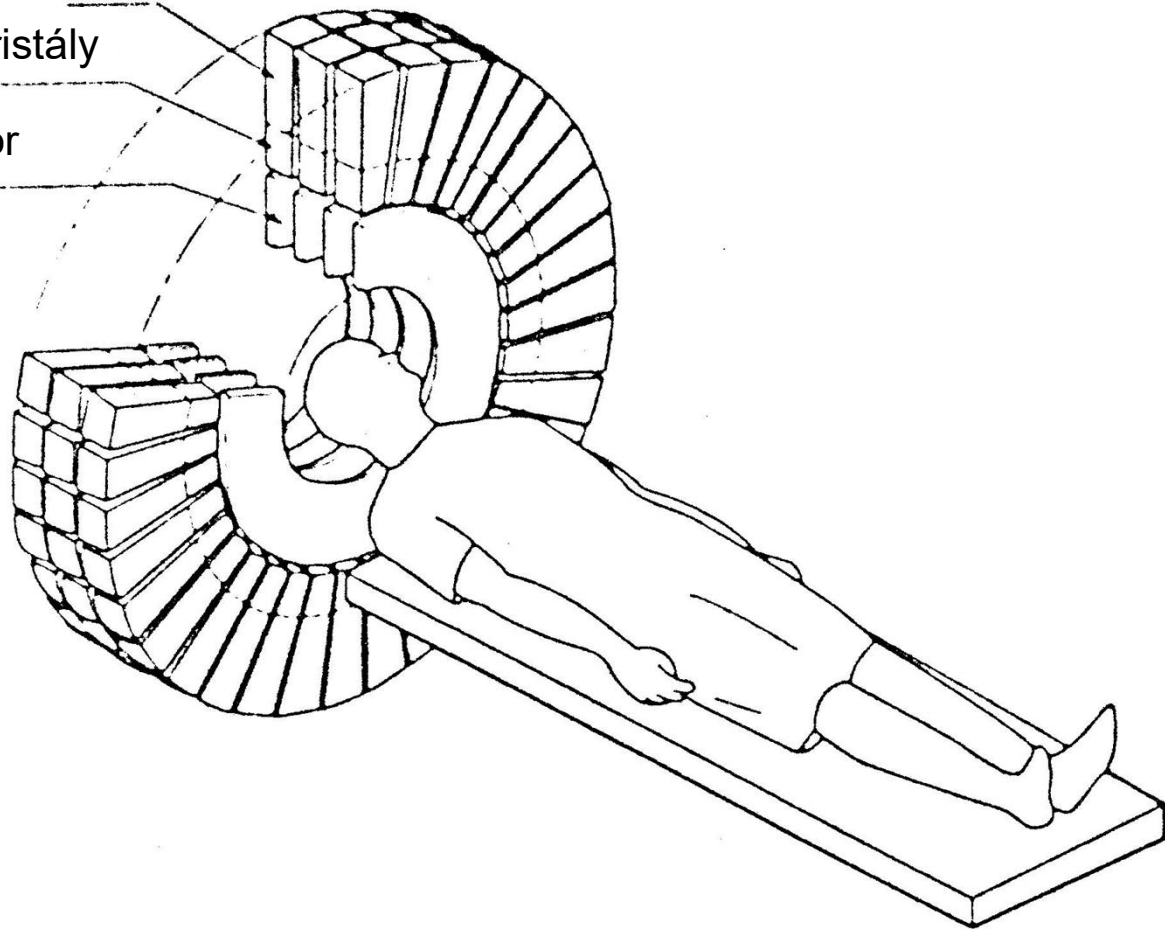


Többszörös detektorgyűrűrendszer => 3D kép

fotoelektronsokszorozó

szcint. kristály

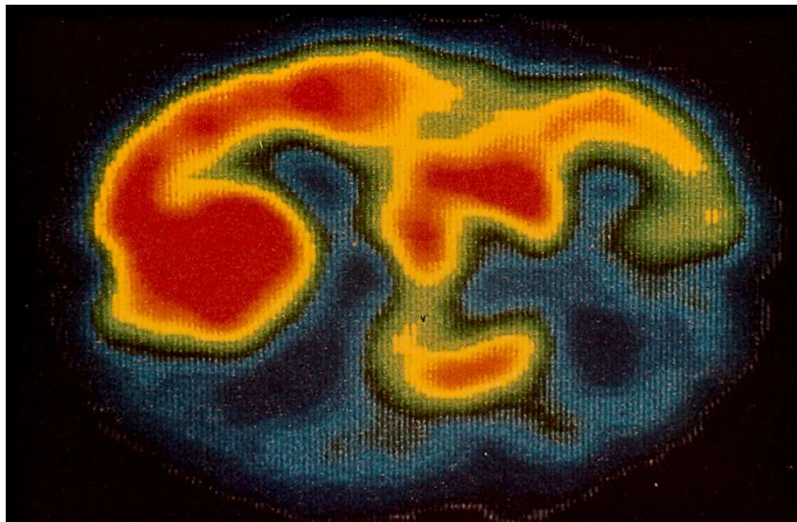
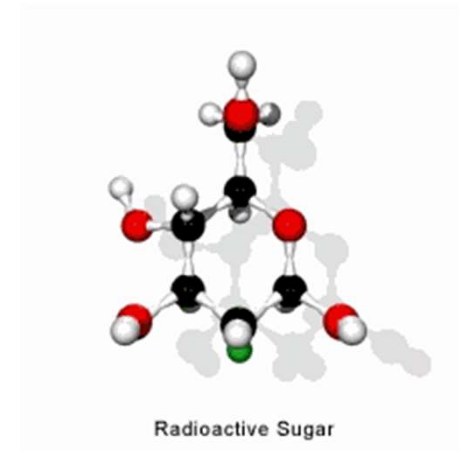
kollimátor



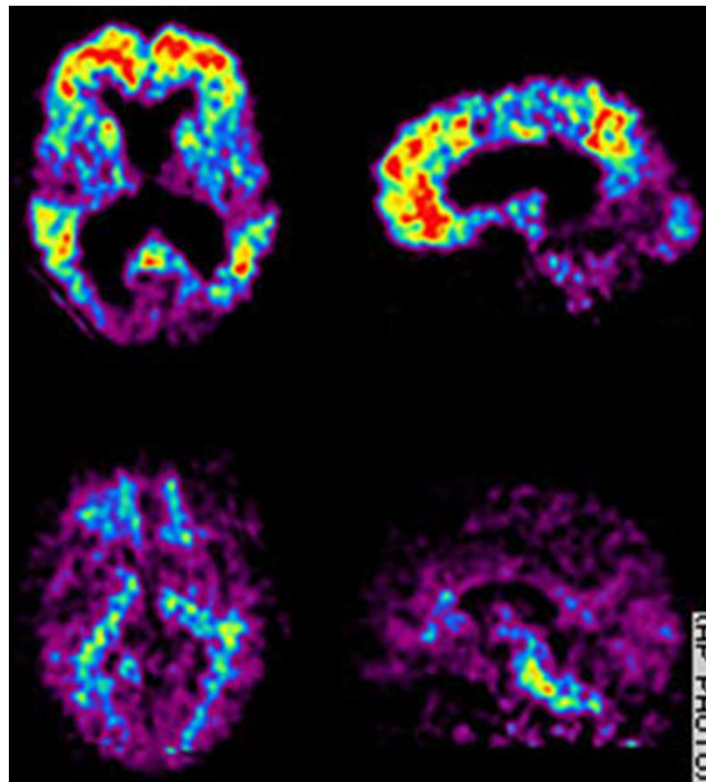
Tipikus vizsgálati szerv az agy
Radiofarmakonok:

^{11}C ^{18}N ^{15}O ^{18}F

FDG ^{18}F dezoxiglükóz



A vizsgálni kívánt tetszőleges biológiai folyamathoz kifejleszthető radiofarmakon. Pl. Alzheimer plakkok kimutatása korai stádiumban



Multimodális eljárások

Kettő, vagy több képalkotó eljárás kombinációja

Előnyök egyesítése

P1: CT: jó anatómiai felbontás
 (de nincs funkcionális információ)

SPECT: funkcionális információ
 (de limitált felbontás)

PET: funkcionális információ
 (de limitált felbontás)

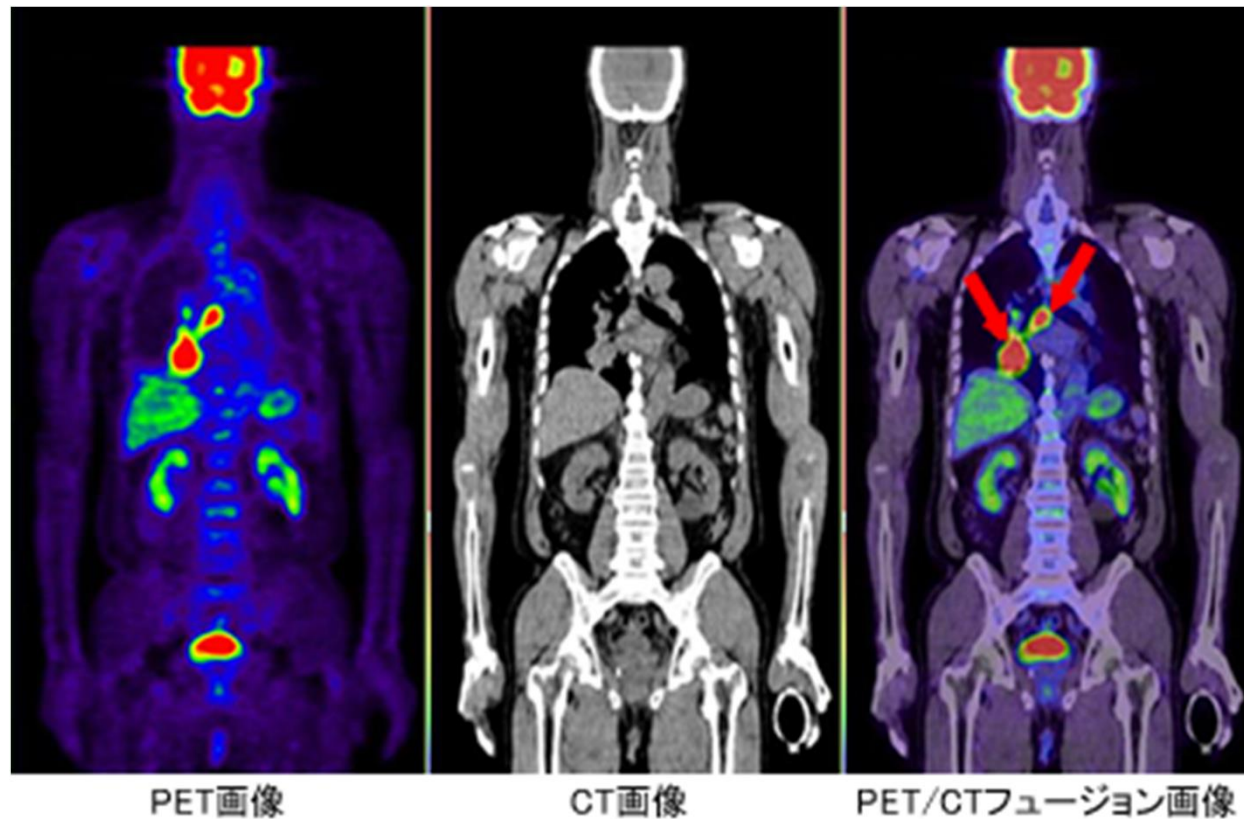


Hibrid berendezés (CT+SPECT)

Multimodális eljárások:

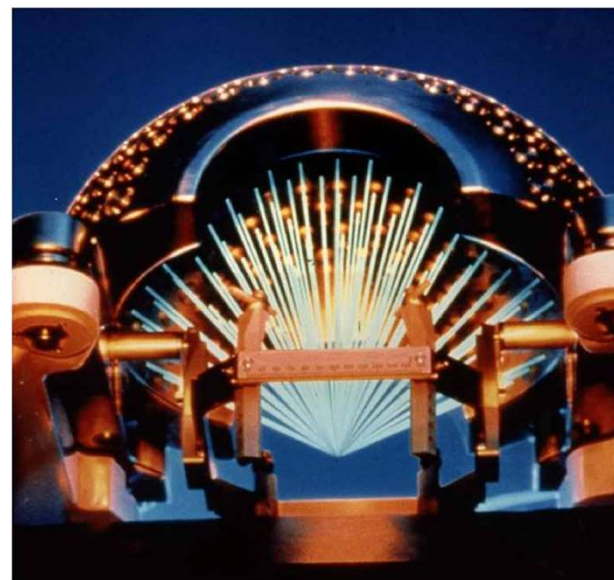
pl.:CT és izotópdiagnosztika kombinálása

PET-CT





2. A sugárterápia fizikai alapjai



Sugárterápia: Ionizáló sugárzás károsító hatásának felhasználása (elsősorban) daganatos szövetek elpusztítására

Kérdések:

1. Milyen típusú sugárzást használjunk?
2. Mekkora dózist alkalmazzunk?
3. Hogyan állítsuk elő?
4. Hogyan juttassuk el a besugározandó testrészbe (a többi szövet károsítása nélkül)?

1. Sugárzás fajtája

α , β , e^- , γ , Rtg, p

elektron foton

α : Kis áthatoló képességű (szövetben $\approx \mu\text{m}$)

Csak a tumoros sejtekbe közvetlenül bejuttatott izotóp esetén hatásos

β^- , gyorsított e^- : mindkettő elektron, de:

↑ folytonos energiaeloszlású
 E_{max} az izotóptól függ

↑ Azonos energiájú elektr.
Energia változtatható

β^-

gyorsított e^-

tipikus energia

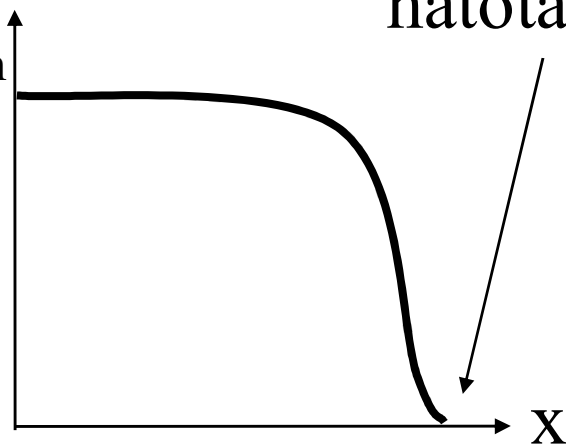
néhány MeV
túl kicsi

10-20 MeV

Elektron sugárzás előállítása: lineáris gyorsító,
(betatron)

elnyelődés:

N_{elektron}

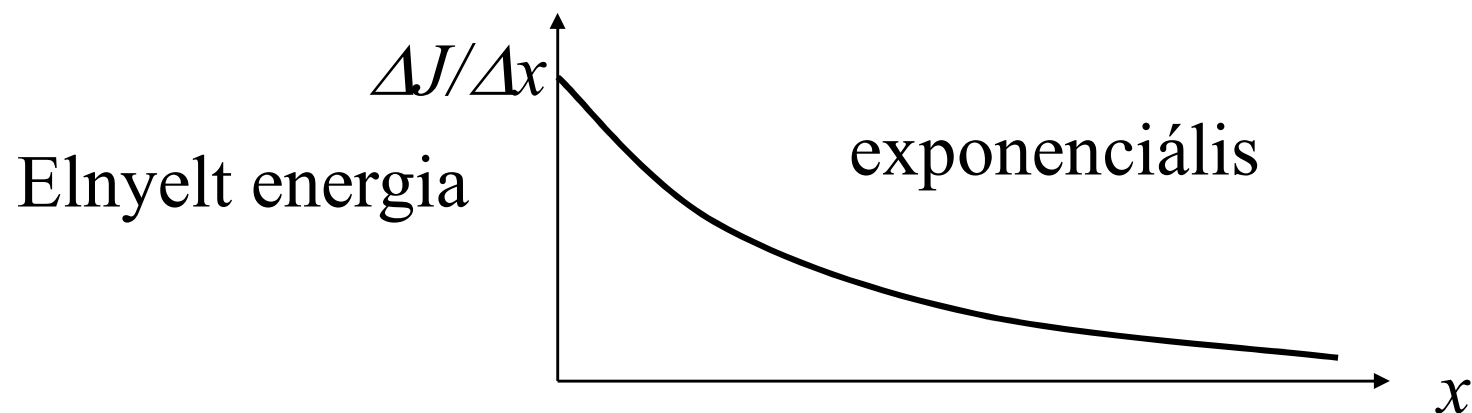
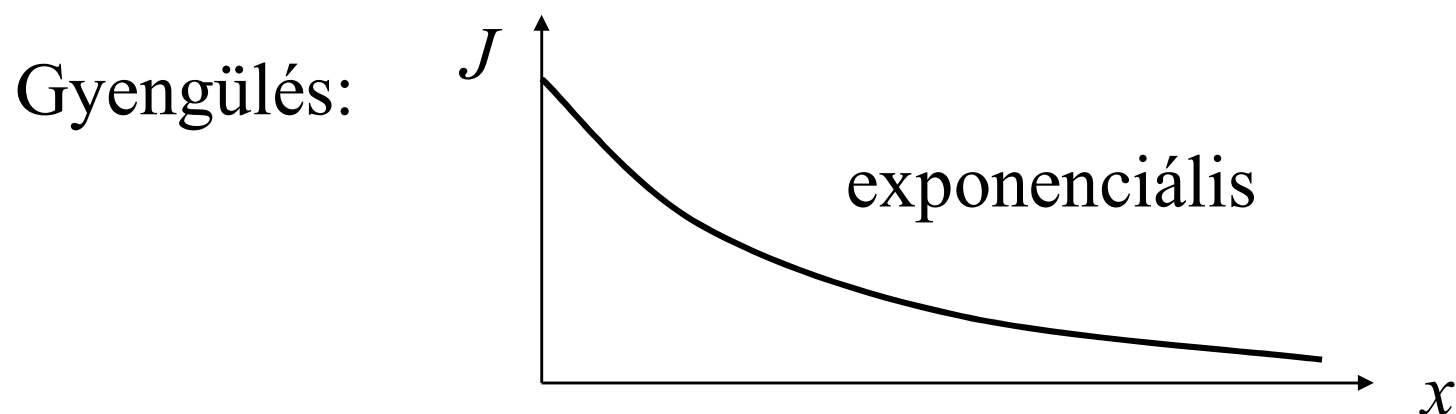


hatótáv! $\approx 1\text{cm}/3\text{MeV}$

gyakorlatban: 6-21 MeV \Rightarrow 2-7 cm felületközei tumorok

γ -sugárzás és Rtg sug.

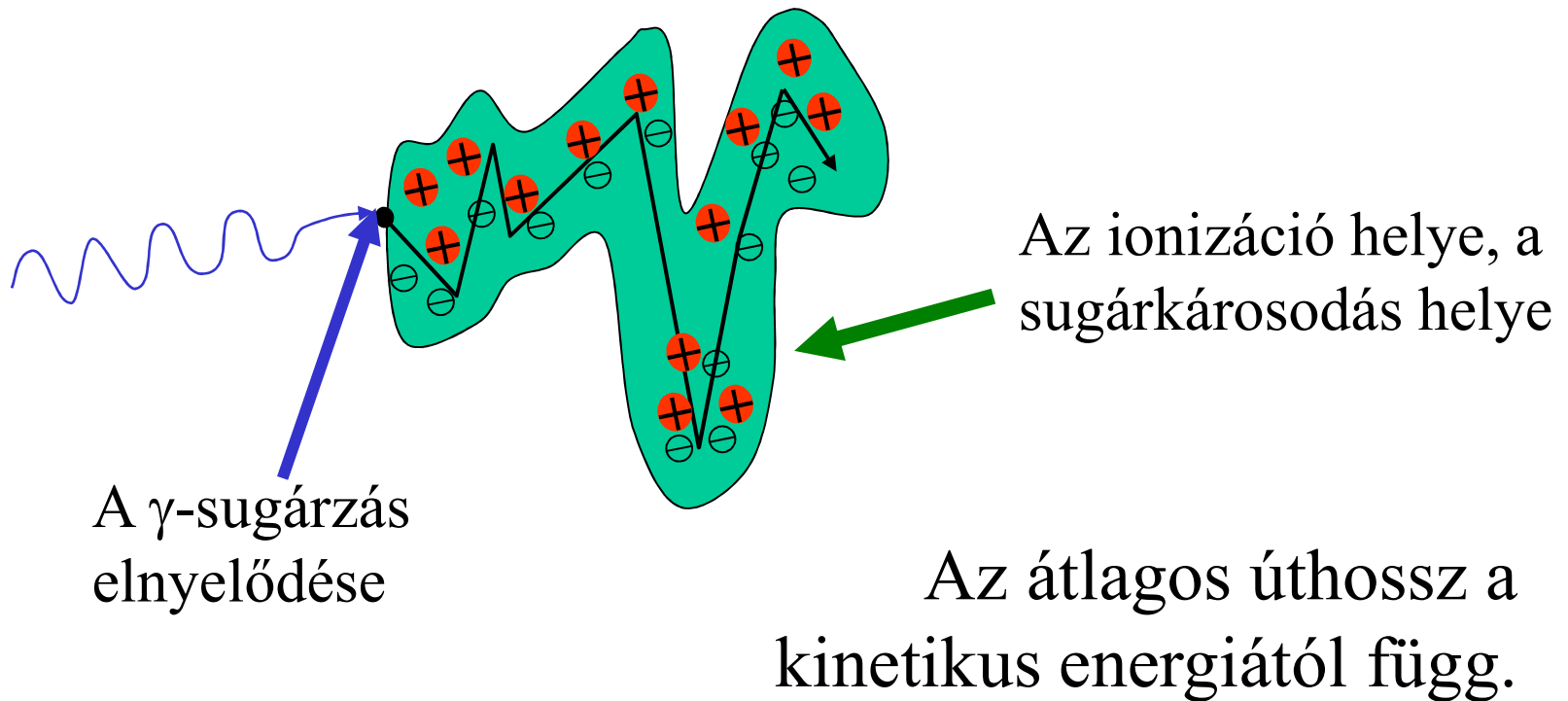
előállításuk és spektrumuk különböző!



De: γ -foton elnyelődésének helye \neq sugárkárosodás helye

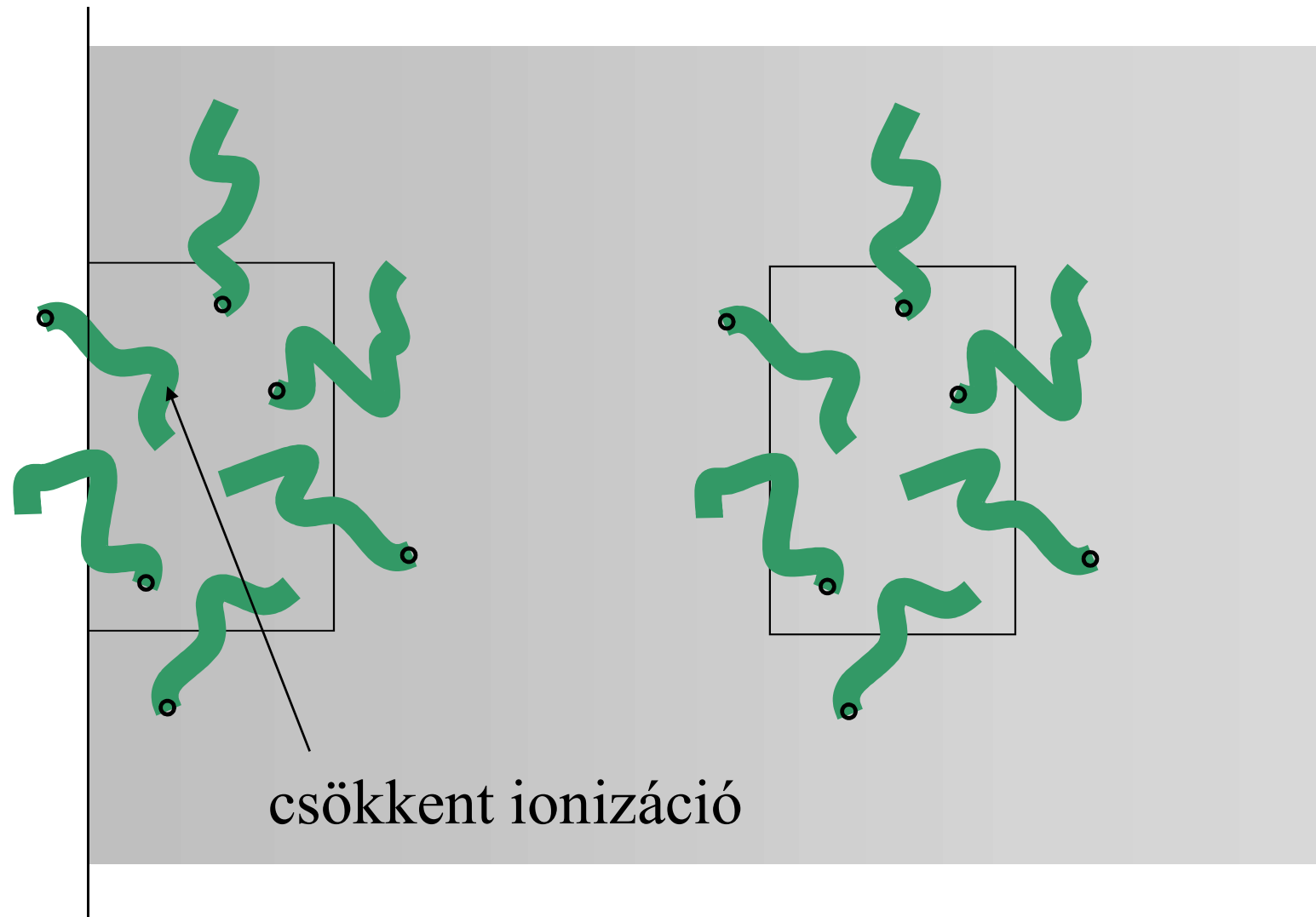
Sugárkárosodás: ionizáció révén nemkívánatos ionok keletkeznek, amelyek károsító biokémiai folyamatokat indítanak be.

=> Sugárkárosodás helye = ionizáció helye

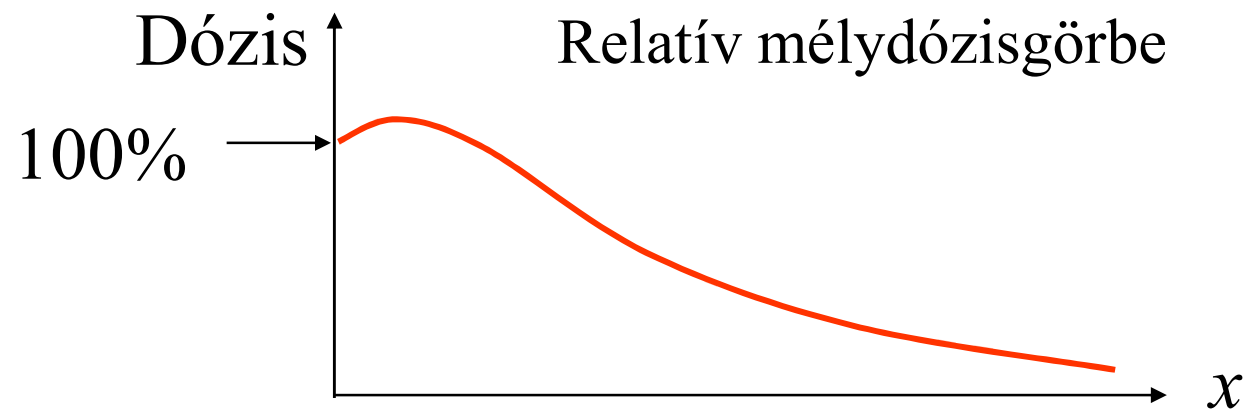
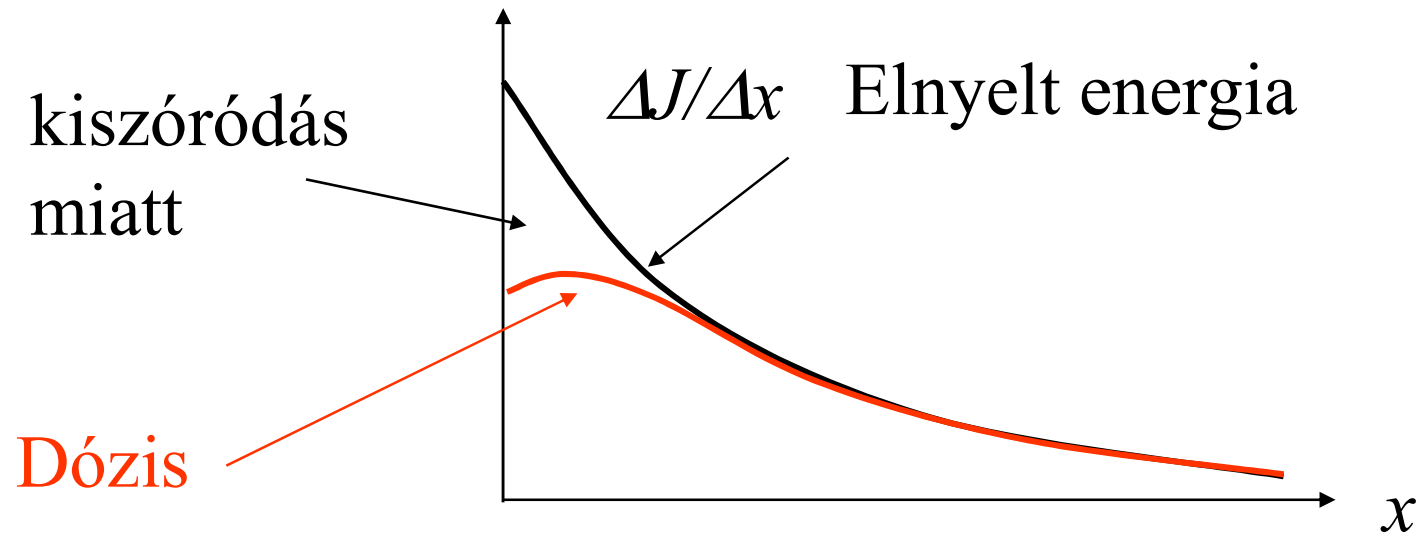


testfelszín

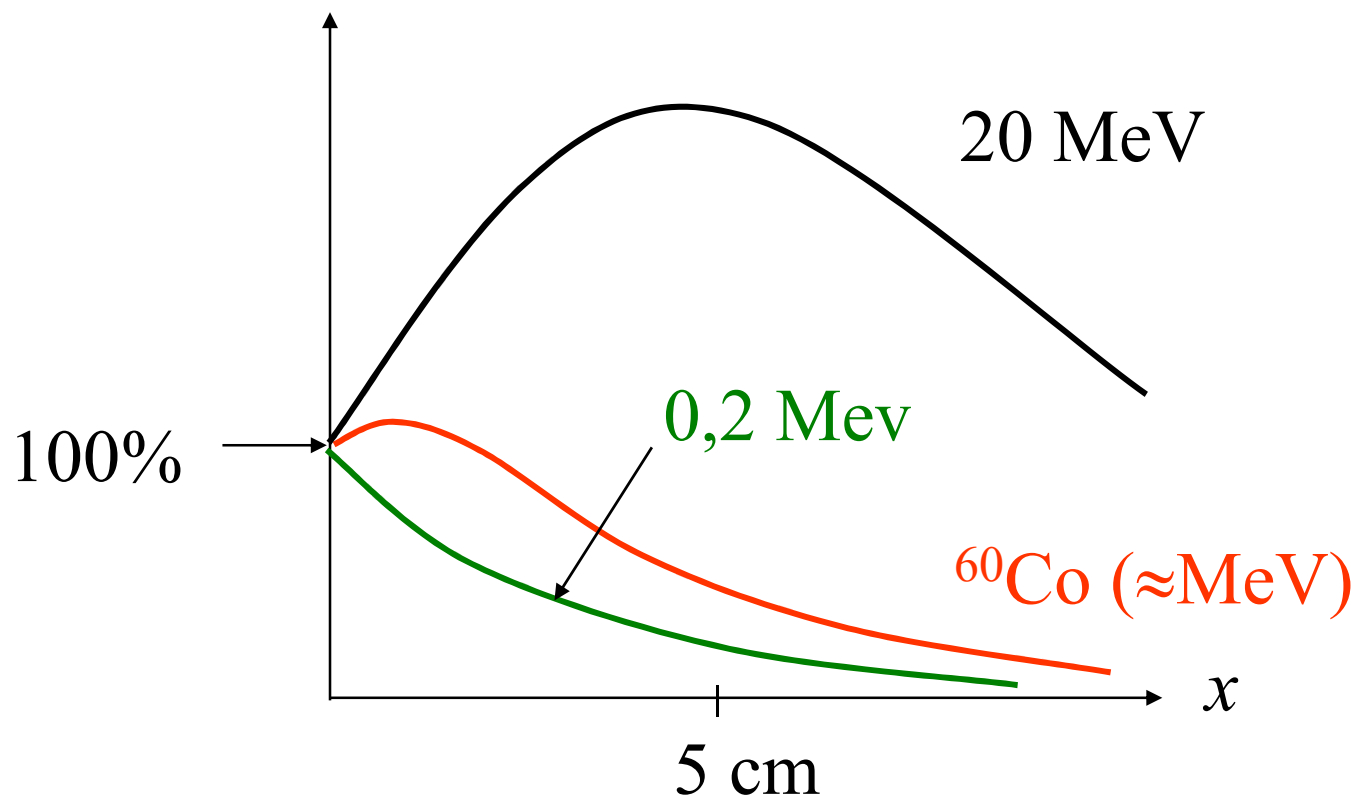
szövetek



Relatív mélydózis



relatív mélydózis



bőrvédelem

Nagy energiájú Rtg sugárzás

Előállítás:

Felgyorsított elektronok ütköztetése anóddal.

Ua. mint a Rtg-cső, de az elektronokat több lépésben, speciális eszközzel gyorsítja (lineáris gyorsító v. ~~betatron~~)

Kikapcsolható!

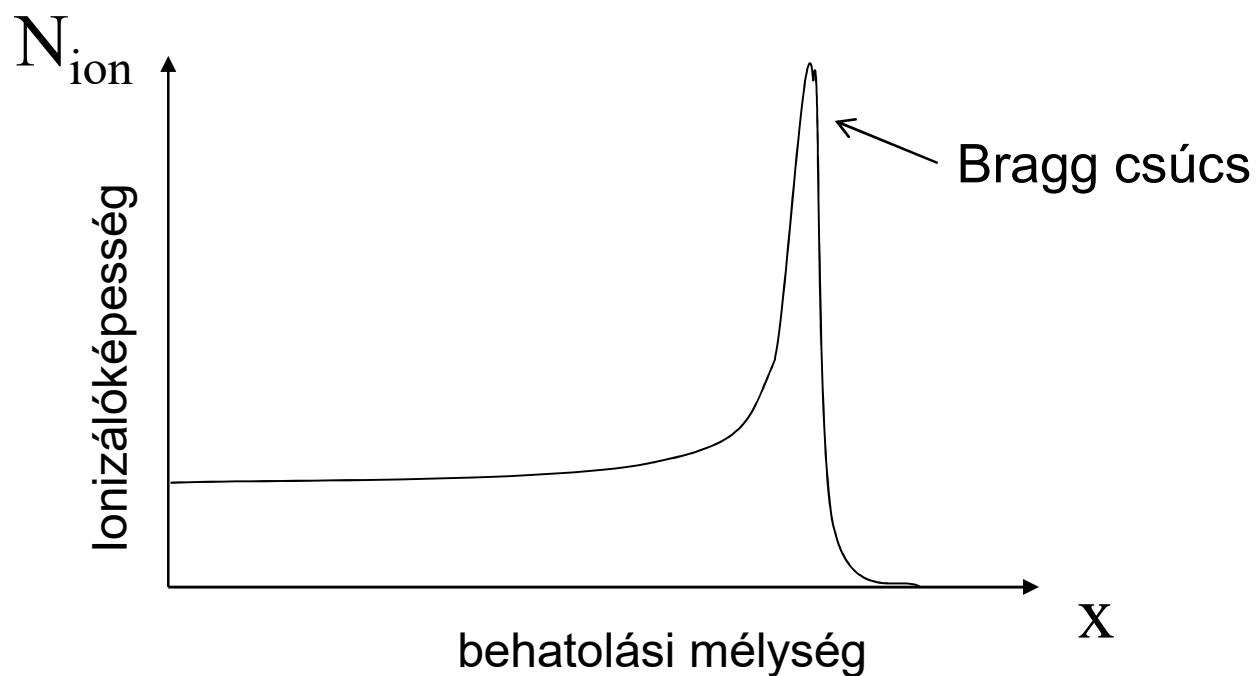
γ forrás: pl. ^{60}Co $E_\gamma \approx \text{MeV}$,

használt aktivitás: TBq



Proton, nagyenergiájú ionok

Ideális lenne, de nagyon drága!
Óriási gyorsító kell!

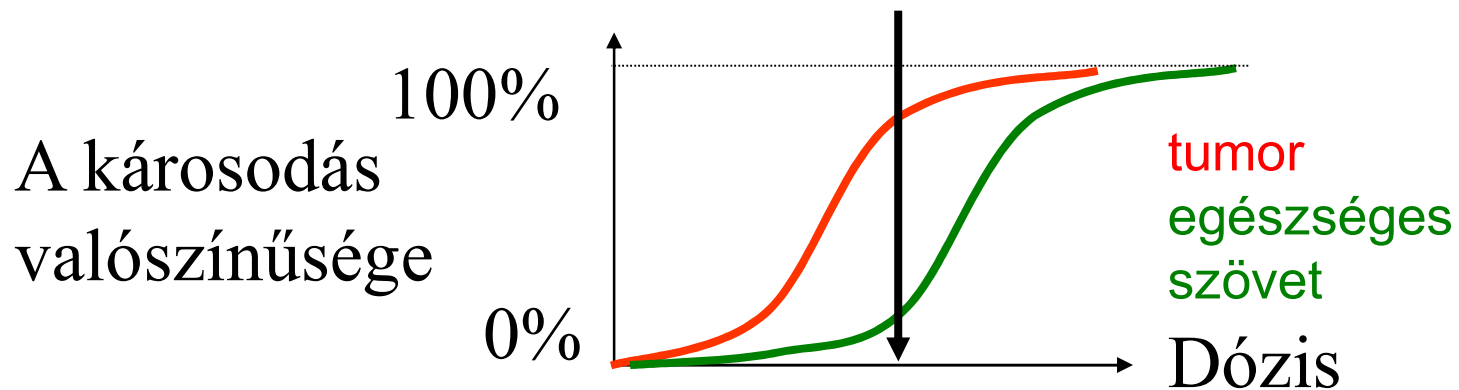


2. Mekkora dózist alkalmazzunk?

Dózis: kb 10x egésztest halálos dózis, de lokalizáltan!

$$E = \sum_{\text{szövetek}} w_{\text{szövet}} H_{\text{szövet}} \quad \text{osztódó szövetek sugárérzékenyek!}$$

Frakcionáltan (20-30 napra elosztva)



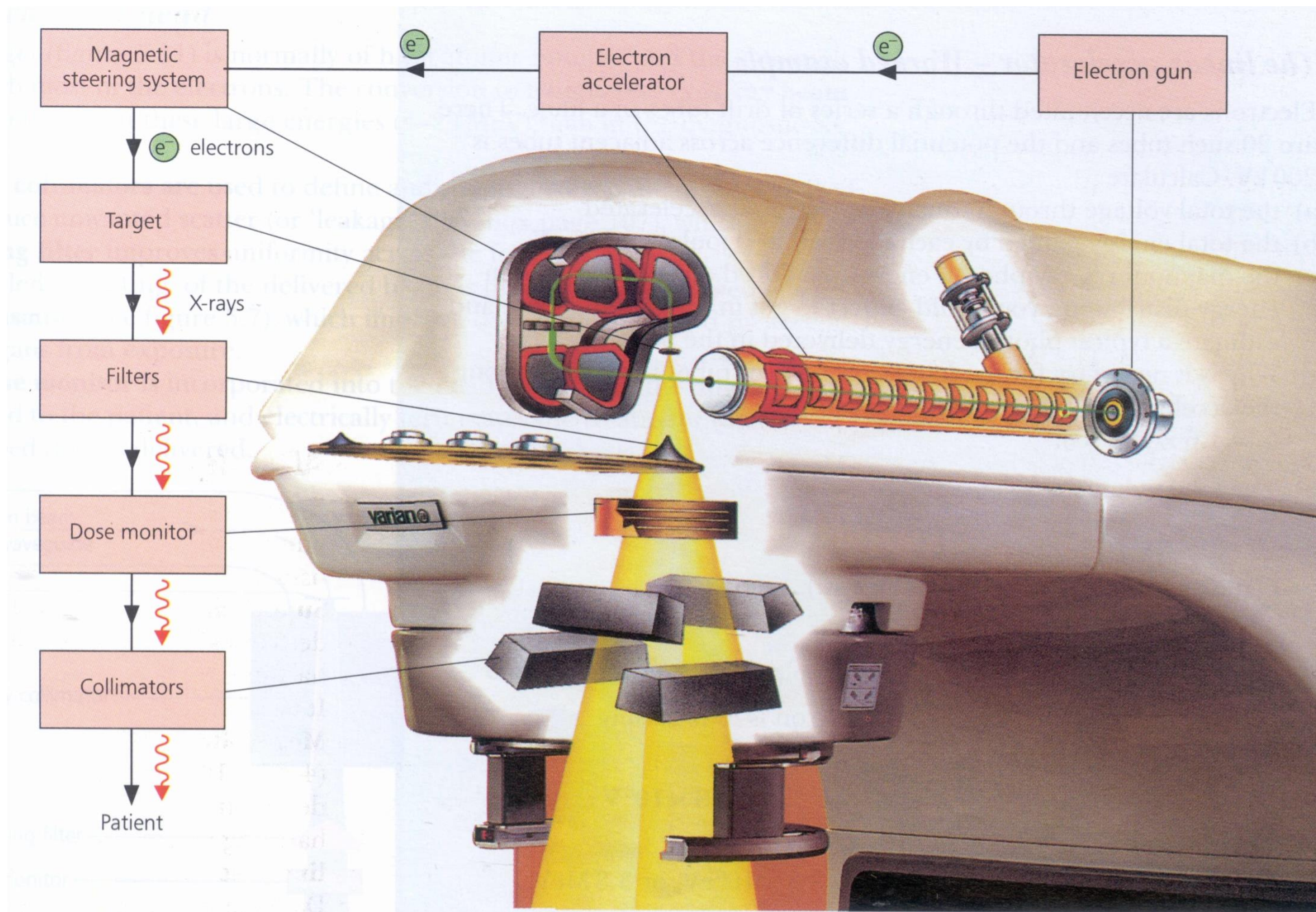
3. A használt sugárzások előállítása

e^- : gyorsító

Rtg: gyorsított elektron ütköztetése

Lineáris gyorsító

Ciklotron



4. Hogyan juttassuk el a sugárzást a besugározandó testrészbe (a többi szövet károsítása nélkül)?



Teleterápia

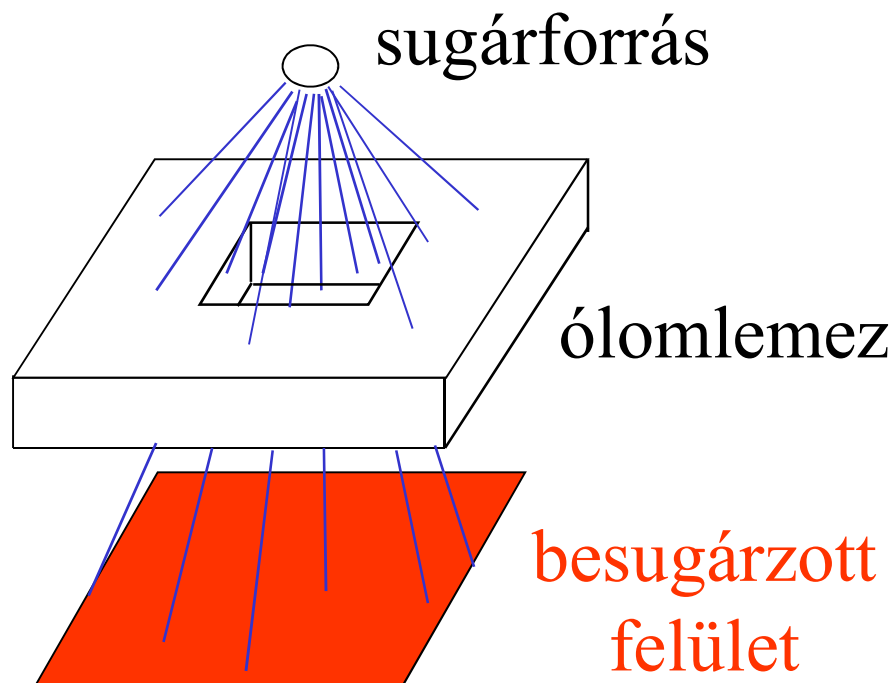
Brachyterápia

Fontos:

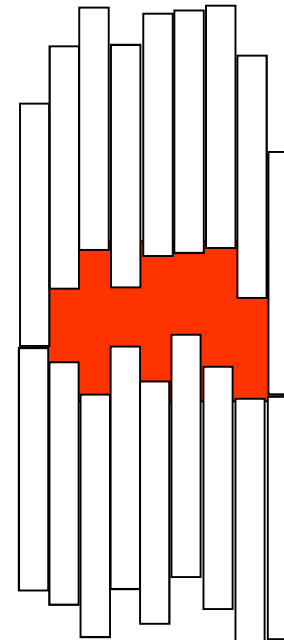
Képalkotó módszereken alapuló besugárzástervezés
(klinikai sugárfizikus végzi)

Teleterápia

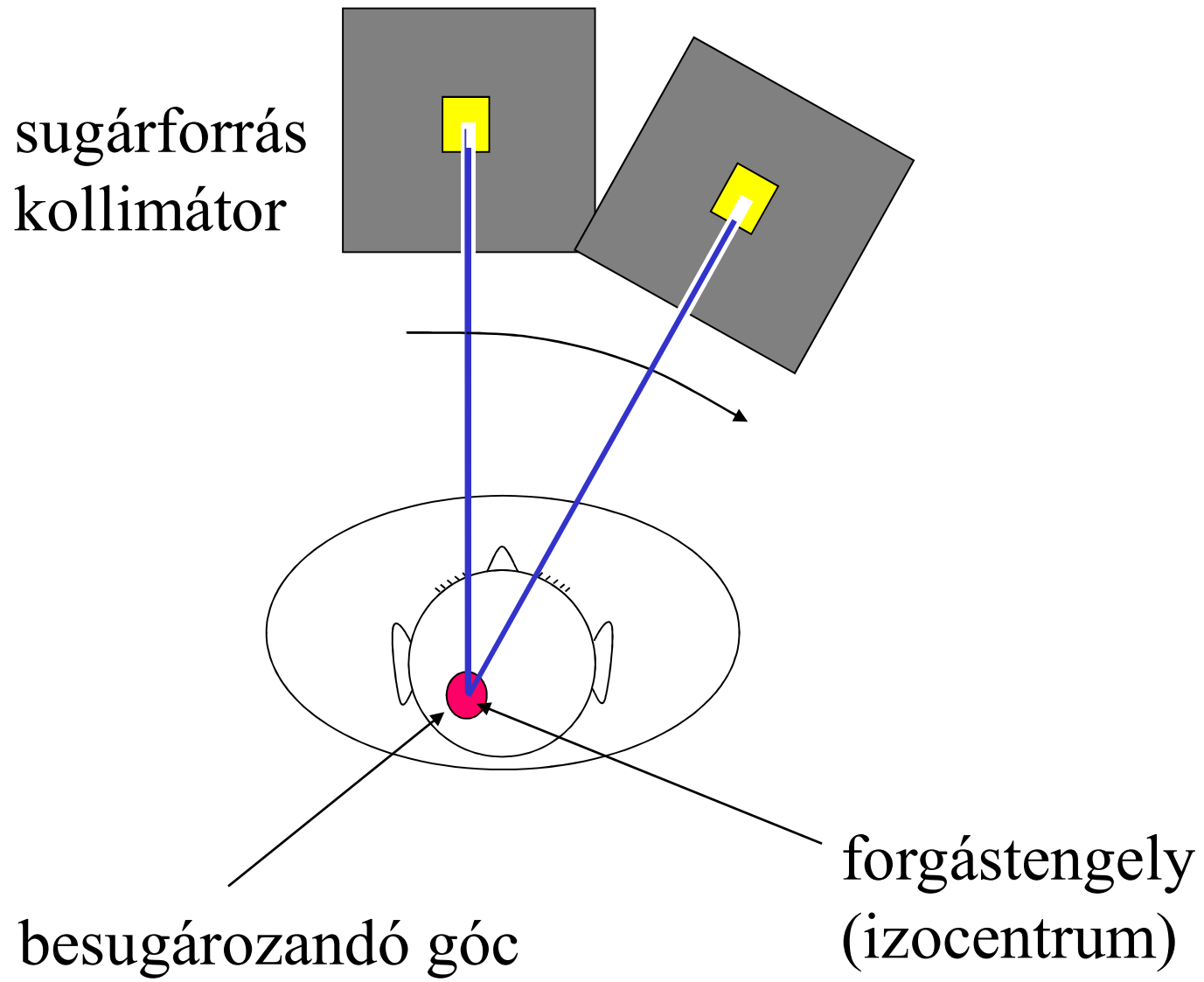
Kollimált sugárnyaláb



lemezes kollimátor



A lemezek mozoghatnak
is: IMRT (intenziás modulált...)





Számítógépes besugárzástervezés CT vagy MRI kép alapján



CT kép

MRI kép



Fontos a képalkotó eljárások és a sugárterápia
integrált alkalmazása

sztereotaxiás keret



CT és lineáris gyorsító



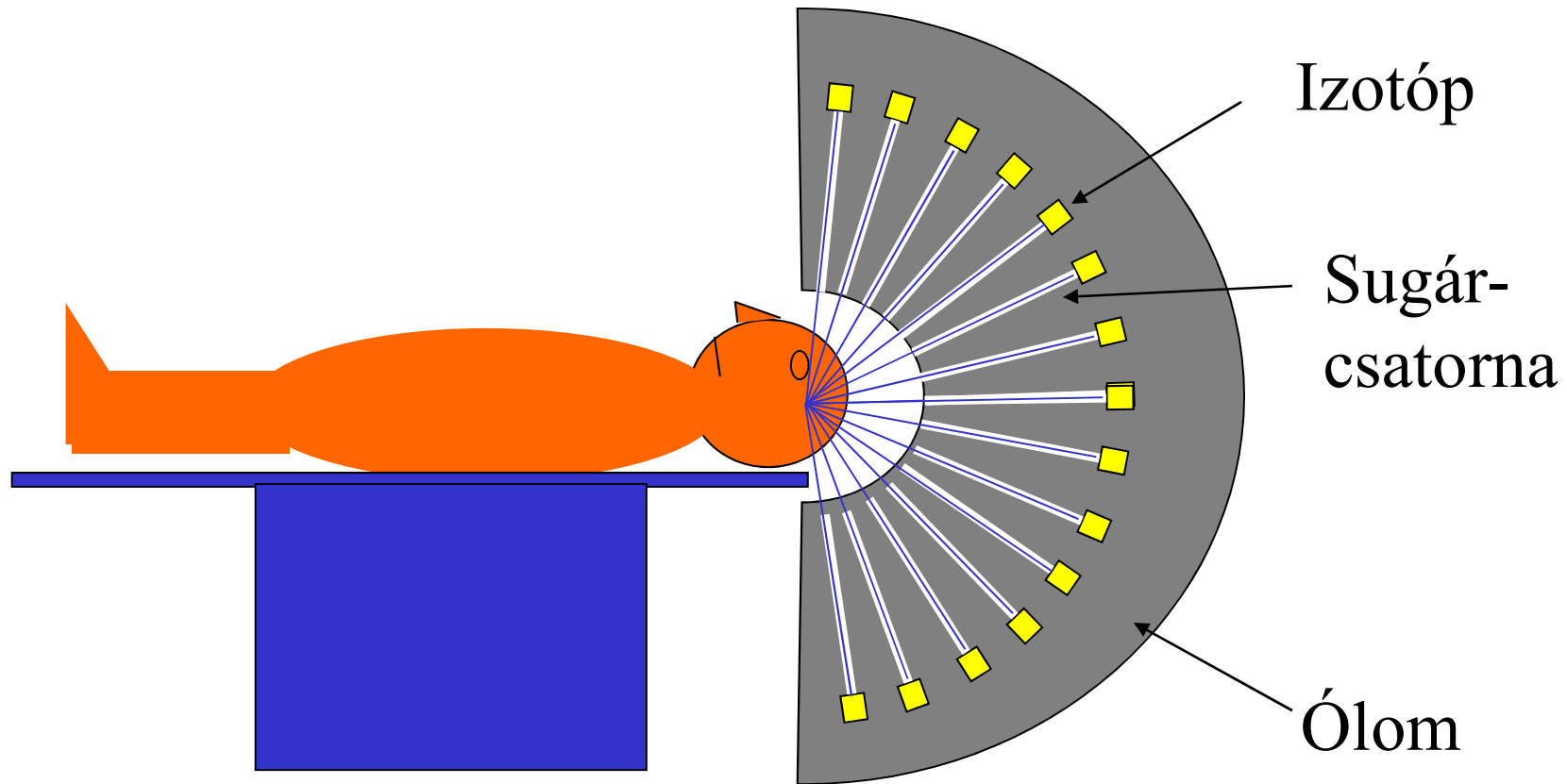
γ -kés

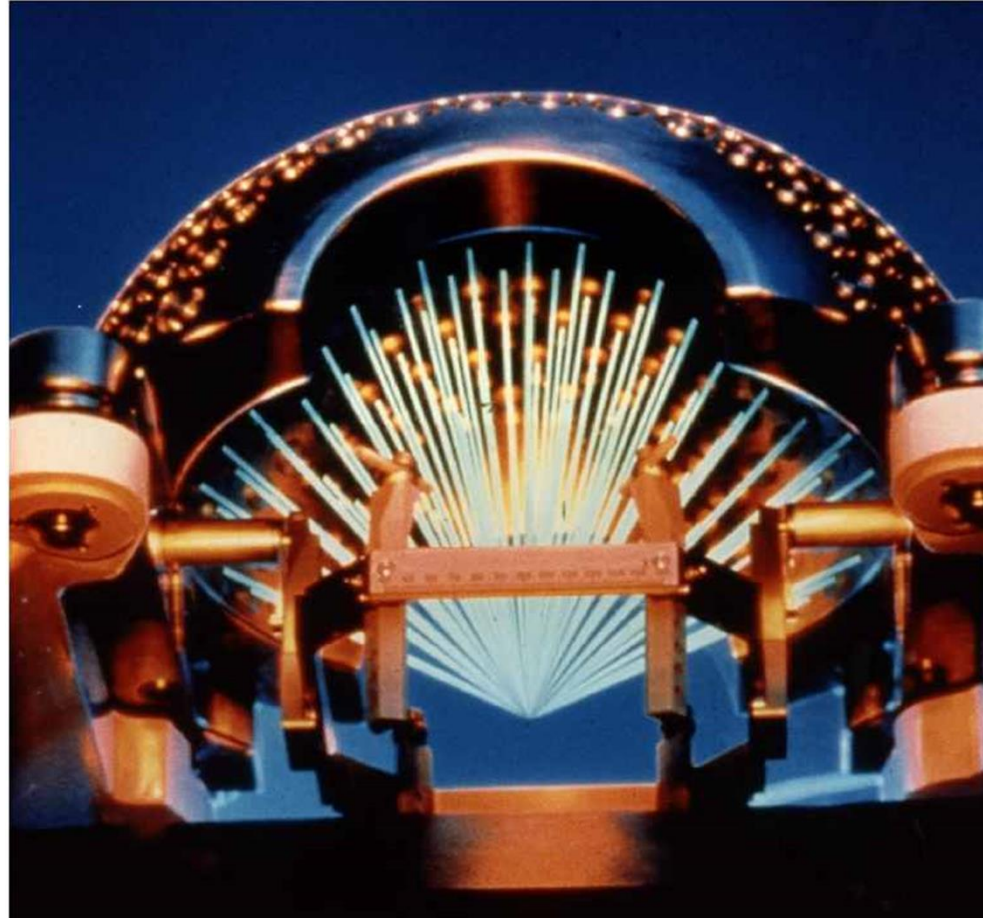
összesen kb. 200 db izotóp
összaktivitás ~ 100 TBq

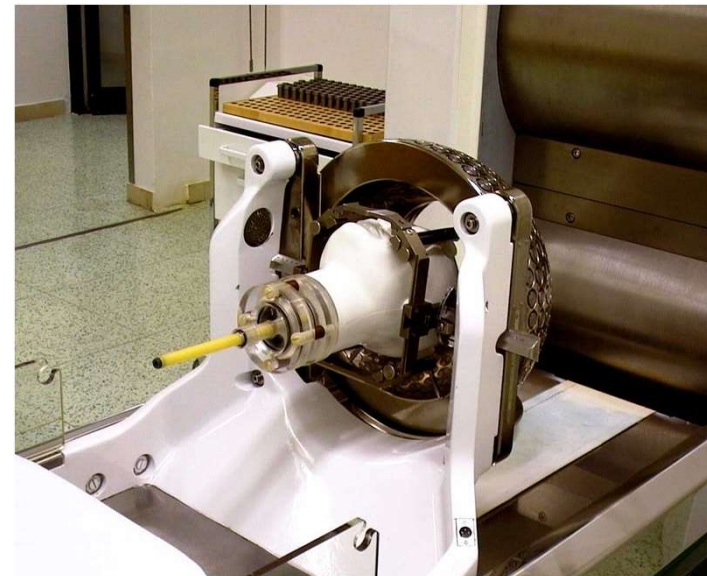
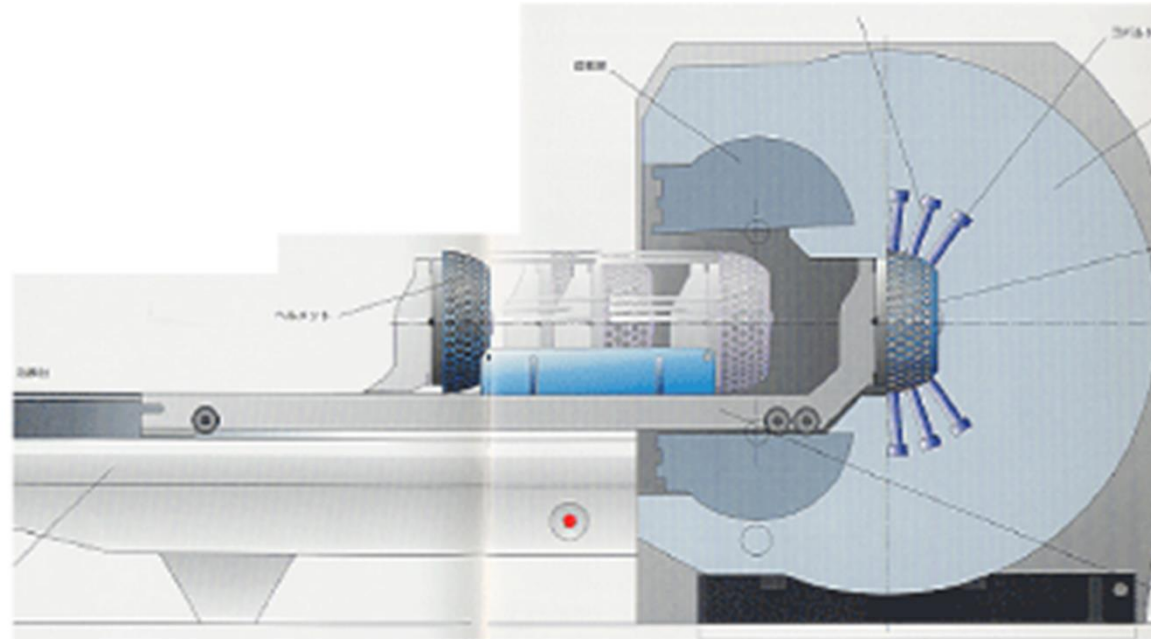
csak a beteg mozog (ágyastul, kerettestül)
mm pontosságú célzás valósítható meg.

agysebészeti célra különösen alkalmas.

Egy sugárforrás körbefordulása helyett: sok sugárforrás amelyek különböző irányokból ugyanarra a pontra irányított sugárnyalábot bocsátanak ki: **Gamma-kés (Gamma Knife)**



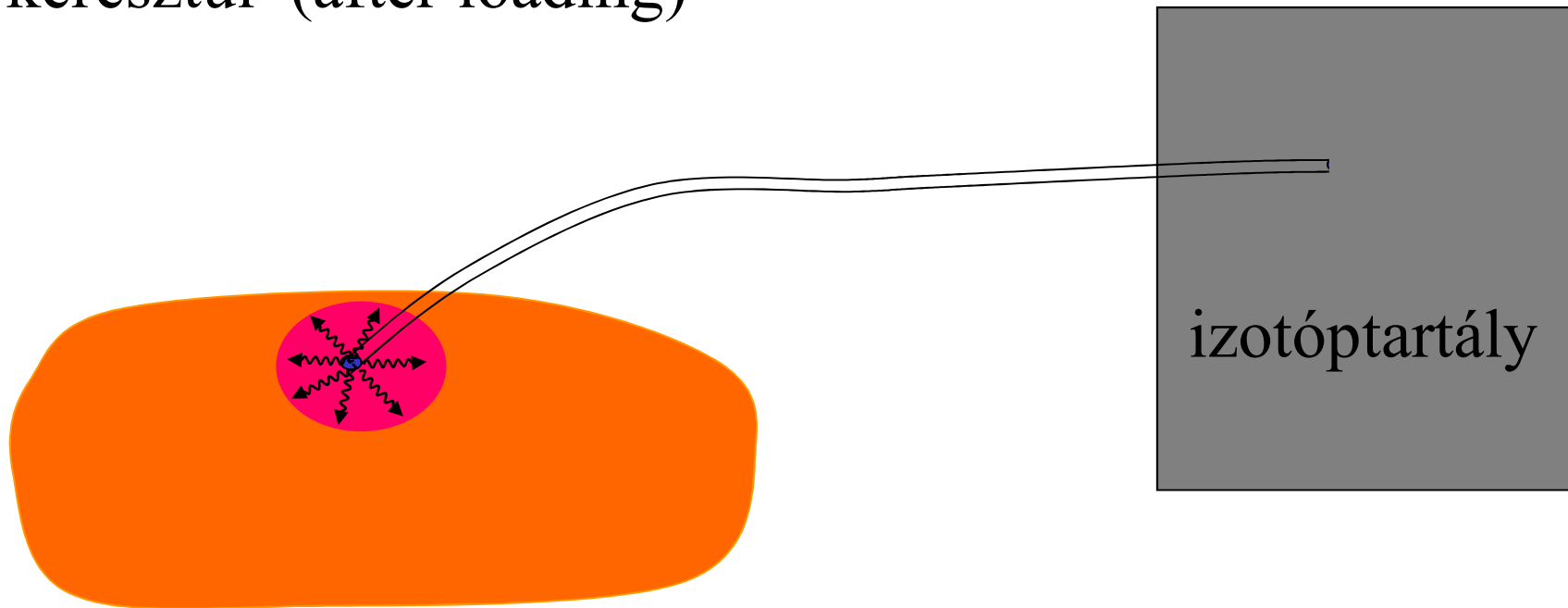




Brachiterápia

Az izotópot a test belsejébe juttatjuk.

Általában egy előre beépített applikátoron keresztül (after loading)



Brachytherapia izotópimplantátumokkal

- Prosztata
- ^{125}I
 $T_{1/2}=60$ nap
foton-
energia=35 keV



Vége!

